TEXTE
64/2017

# Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest

## Abschlussbericht

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 64/2017

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3713 16 103
UBA-FB 002530

# Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest

von

Jan Hendrik Trapp, Dr. Wulf-Holger Arndt, Dr. Jens Libbe, Dr. Stefan Schneider,
Maic Verbücheln, Jan Winkelhaus
Difu, Berlin

Moritz Mottschall, Dr. Dierk Bauknecht, Thomas Bergmann, Jens Gröger
Öko-Institut, Berlin

Unter Mitarbeit von:
Sven Hausigke
Difu, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

# Impressum

**Herausgeber:**
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

**Durchführung der Studie:**
Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu)
Zimmerstraße 13 – 15
10969 Berlin

**Abschlussdatum:**
Februar 2017

**Redaktion:**
Fachgebiet I 3.5 Nachhaltige Raumentwicklung, Umweltprüfungen
Dr. Züleyha Iyimen-Schwarz

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, August 2017

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3713 16 103 finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Kurzbeschreibung

Technische Infrastruktursysteme sind ressourcenintensiv. Errichtung, Instandhaltung, Betrieb, Rückbau und Entsorgung sind mit dem Verbrauch von Ressourcen wie Energie, Material und Fläche verbunden. Bei der Suche nach Möglichkeiten zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs stellen sie daher einen Ansatzpunkt dar. Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist es, Vorschläge für Handlungsempfehlungen für eine ressourcenleichte und zukunftsfähige Gestaltung von Infrastrukturen unter Berücksichtigung wesentlicher Veränderungsprozesse und Zukunftstrends wie beispielsweise demografischer Wandel, Klimawandel, technologischer Wandel oder gesellschaftlicher Wandel zu erarbeiten. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Vorhabens zuerst der Bestand an technischen Infrastrukturen ermittelt sowie eine Stärken- und Schwächenanalyse der Infrastruktursysteme vorgenommen. Darauf aufbauend wurden Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen (Szenarien mit dem Zeithorizont 2050) entwickelt, die unterschiedliche Konstellationen von Infrastrukturgestaltungen abbilden. Diese wurden einem Referenzszenario (aktuelle Maßnahmen) gegenübergestellt und mithilfe von Ergebnissen einer orientierenden Stoffstromanalyse und Kostenabschätzungen sowie qualitativen Analysen ausgewertet. Flankiert bzw. untermauert werden diese Ergebnisse von einer Zusammenstellung von Best-Practice-Beispielen im Untersuchungsfeld. In der Gesamtschau der Ergebnisse werden Empfehlungen zur Gestaltung ressourcenleichter zukunftsfähiger Infrastrukturen entwickelt, die mit Maßnahmen und Instrumenten hinterlegt sind.

## Abstract

Technical infrastructure systems are resource intensive. Their construction, maintenance, operation, demolition and disposal are associated with the consumption of resources such as energy, materials and space. They therefore represent a good starting point in the search for ways to reduce consumption of resources. The overarching objective of the project was to develop proposals for a resource-light, future-proof infrastructure design taking into account essential change processes and future trends in relation to demographic change, climate change, technological advances and social change for example. To this end, the scope of the technical infrastructure was initially determined and then an analysis undertaken on the strengths and weaknesses of the infrastructure systems. Based on this, case studies of resource-light infrastructures (scenarios in the year 2050) were developed that represent different constellations of infrastructure designs. They were compared with a reference scenario (based on current actions) and evaluated with the results of a preliminary material flow analysis and cost estimations, as well as qualitative analyses. The results were accompanied by a compilation of examples of best practice in the study area. In conclusion, recommendations have been made relating to the design of resource-light, future-proof infrastructures, including the actions and tools required to implement them.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... 12
Tabellenverzeichnis ..... 21
Tabellen im Anhang (Teil F) ..... 22
Übersichtsverzeichnis ..... 24
Abkürzungsverzeichnis ..... 25
Zusammenfassung ..... 29
Summary ..... 43
Einleitung ..... 56

Teil A: Einführung und Methodik ..... 58

1 Ziel und Gegenstand des Forschungsvorhabens ..... 58
1.1 Ziel des Forschungsvorhabens ..... 58
1.2 Gegenstand der Untersuchung – Systemgrenzen der Infrastrukturen und ihrer Teilsysteme ..... 59
1.2.1 Systemgrenzen der Energieversorgungssysteme ..... 59
1.2.2 Systemgrenzen Verkehr ..... 61
1.2.3 Systemgrenzen der öffentlichen Wasserwirtschaft ..... 64
1.2.4 Systemgrenzen der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ..... 66
2 Vorgehen und methodische Grundlagen ..... 66
2.1 Struktur des Vorhabens ..... 67
2.2 Methodische Grundlagen ..... 68
2.2.1 Orientierende Stoffstromanalyse der Infrastrukturen ..... 69
2.2.2 Kostenabschätzung ..... 74
2.2.3 Qualitative Ansätze zur Konzeption und Einschätzung der Fallstudien ..... 76

Teil B: Infrastruktursysteme – Analyse von Veränderungsprozessen, Zukunftstrends und Anpassungsoptionen der Infrastrukturen ..... 82

1 Allgemeine, Infrastruktursektoren übergreifende Veränderungsprozesse der Rahmenbedingungen und Zukunftstrends ..... 82
2 Rechtliche Anforderungen an Infrastrukturen im Rahmen der Daseinsvorsorge ..... 84
3 Identifikation von Optionen und strategischen Ansatzpunkten zur Reduktion der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen ..... 88
3.1 Energieinfrastruktur ..... 88
3.1.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends ..... 88
3.1.2 Optionen zur Anpassung der Energieinfrastruktur ..... 91
3.1.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Stromversorgung“ ..... 93

3.1.4 Strategische Ansatzpunkte für die Stromversorgung ..... 93
3.1.5 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Gasversorgung“ ..... 95
3.1.6 Strategische Ansatzpunkte für die Gasversorgung ..... 95
3.1.7 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Wärmeversorgung“ ..... 97
3.1.8 Strategische Ansatzpunkte für die Wärmeversorgung ..... 97
3.1.9 Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen): ..... 98
3.2 Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur ..... 98
3.2.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends ..... 98
3.2.2 Optionen zur Anpassung der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur ..... 99
3.2.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Wasserversorgung“ ..... 100
3.2.4 Strategische Ansatzpunkte für die Wasserversorgung ..... 101
3.2.5 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Abwasserentsorgung“ ..... 102
3.2.6 Strategische Ansatzpunkte für die Abwasserentsorgung ..... 103
3.3 Verkehrsinfrastruktur ..... 104
3.3.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends ..... 104
3.3.2 Optionen zur Anpassung der Verkehrsinfrastruktur ..... 107
3.3.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Straße“ ..... 111
3.3.4 Strategische Ansatzpunkte für die Straße ..... 111
3.3.5 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Schiene“ ..... 113
3.3.6 Strategische Ansatzpunkte für die Schiene ..... 114
3.3.7 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Luftverkehr“ ..... 115
3.3.8 Strategische Ansatzpunkte für den Luftverkehr ..... 116
3.3.9 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Schifffahrt“ ..... 117
3.3.10 Strategische Ansatzpunkte für die Binnenschifffahrt ..... 118
3.4 Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (IKT) ..... 119
3.4.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends ..... 119
3.4.2 Optionen zur Anpassung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur ..... 120
3.4.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Informations- und Kommunikationstechnologien“ ..... 122
3.4.4 Strategische Ansatzpunkte für die IKT ..... 122

Teil C: Szenarien ..... 124

1 Referenzszenario ..... 126
1.1 Grundlegende Annahmen im Referenzszenario ..... 126

1.1.1 Sektorenübergreifende Annahmen ..... 127
1.1.2 Sektorenspezifische Annahmen ..... 127
1.2 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für das Referenzszenario ..... 134
1.2.1 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Energie ..... 136
1.2.2 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Wasserver- und Abwasserentsorgung ..... 141
1.2.3 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Verkehr ..... 144
1.2.4 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Informations- und Kommunikationstechnologie ..... 150
1.3 Gesamtergebnisse der Analysen und Abschätzungen im Referenzszenario ..... 152
1.4 Ergebnisse der Kostenabschätzung im Referenzszenario ..... 154
2 Vier Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen ..... 155
2.1 Entwicklung der Fallstudien und der Berechnung der orientierenden Stoffstromanalysen ..... 157
2.2 Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ ..... 159
2.2.1 Das Szenario im Jahr 2050) ..... 159
2.2.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen ..... 163
2.2.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie ..... 164
2.2.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 165
2.2.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 178
2.2.6 Abschätzung der Kostenentwicklung in der Fallstudie ..... 179
2.2.7 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie ..... 179
2.3 Fallstudie „Kopplungen Energie – Verkehr“ ..... 182
2.3.1 Das Szenario im Jahr 2050 ..... 182
2.3.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen ..... 185
2.3.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie ..... 186
2.3.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 187
2.3.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 198
2.3.6 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie ..... 204
2.4 Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ ..... 207
2.4.1 Das Szenario im Jahr 2050 ..... 207
2.4.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen ..... 210
2.4.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie ..... 210

2.4.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 210
2.4.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 221
2.4.6 Abschätzung der Kostenentwicklung in der Fallstudie ..... 225
2.4.7 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie ..... 225
2.5 Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ ..... 228
2.5.1 Das Szenario im Jahr 2050 ..... 228
2.5.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen ..... 230
2.5.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie ..... 231
2.5.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 232
2.5.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse ..... 245
2.5.6 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie ..... 248
3 Vertiefende Untersuchung der Fallstudien ..... 250
3.1 Hemmnisse der Anpassung und Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme in den Szenarien ..... 250
3.1.1 Institutionen ..... 251
3.1.2 Technik ..... 252
3.1.3 Akteure ..... 253
3.1.4 Prozessmanagement: strategische Orientierung, Komplexität, Zeit ..... 255
3.1.5 Daten/Digitalisierung ..... 257
3.2 Sensitivitätsanalysen ..... 257
3.3 Szenaretten ..... 262
3.3.1 Ressourcenleichte Kombination grauer und grün-blauer Infrastrukturen im dezentralen Regenwassermanagement ..... 262
3.3.2 Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung ..... 263
3.3.3 Errichtung von Windkraftanlagen als Gitternetztürme ..... 266
3.3.4 Ausbau IKT-Netz langfristig mittels Glasfaser statt Kupfer ..... 267
3.4 Zeitpunkte der Systemanpassung ..... 268
4 Schlussfolgerungen aus den Analysen der Szenarien ..... 272

Teil D: Best-Practice-Beispiele ..... 278

1 Einführung ..... 278
1.1 Herausforderungen im Kontext der BPB ..... 278
1.2 Vorgehen zur Identifizierung von 20 BPB ..... 280
2 Darstellung der ausgewählten Best-Practice-Beispiele (BPB) ..... 282
2.1 BPB im Cluster Energie ..... 283

2.1.1 Power-to-Heat-Anlage der Technischen Werke Ludwigshafen ..... 283
2.1.2 Smart Grids Modellregion Salzburg ..... 287
2.1.3 Virtuelles Kraftwerk der ABG Frankfurt Holding und der Mainova AG ..... 291
2.1.4 Hybrides-Kraftwerk Prenzlau – Wasserstoff-Wind-Biogas ..... 295
2.1.5 Regionales Regelkraftwerk Feldheim (RRKW) ..... 298
2.2 BPB im Cluster Wasser ..... 302
2.2.1 Abwärme aus Abwasser am Beispiel von IKEA in Berlin ..... 302
2.2.2 Fernkälte aus Grundwasserüberleitung für Rechenzentrum in München ..... 306
2.2.3 Ökologisches Bauen mit Komposttoiletten und Pflanzenkläranlage in Schöneiche ..... 310
2.2.4 Kleinkläranlagen entlasten kommunale Haushalte – Beispiel „Dahler Feld“ ..... 312
2.3 BPB im Cluster Mobilität ..... 316
2.3.1 Optimierung der Warenlieferungslogistik mit dem Cargohopper ..... 316
2.3.2 Nachhaltige Mobilität im urbanen Raum durch Umsetzung des Fahrradkonzepts Kopenhagen ..... 320
2.3.3 Mobilcard Krenglbach (inkl. eCar-Sharing) ..... 325
2.3.4 Interurbanes Verkehrsmanagement Stockholm ..... 328
2.3.5 Intermodalitätskarte Stuttgart ..... 332
2.3.6 Elektro-Bürgerrufauto in Oberreichenbach ..... 335
2.3.6 StreetScooter in Bonn – $CO_2$-Freie Zustellung durch DP/DHL ..... 337
2.4 BPB im Cluster Integrierte Planung/Ressourcen ..... 340
2.4.1 Umsetzung des eco-cycle-models am Beispiel Hammarby-Sjöstad in Stockholm ..... 340
2.4.2 Nutzung von Biogas zum Antrieb von Müllfahrzeugen der Berliner Stadtreinigung (BSR) ..... 344
2.4.3 Der Einsatz von Recycling-Beton durch die Ressourcenstrategie Zürich ..... 347
2.4.4 Maximalrecycling 90 in Baden-Württemberg ..... 352

Teil E: Empfehlungen ..... 355

1 Empfehlungen im Überblick ..... 355
2 Handlungsempfehlungen im Detail ..... 357
2.1 Handlungsfeld: Bewusstsein schaffen, Ziele festlegen ..... 357
Empfehlungen ..... 358
2.2 Handlungsfeld: Unterschiedliche räumliche Kontexte beachten ..... 359
Empfehlungen ..... 360
2.3 Handlungsfeld: Gebauter Infrastrukturbestand – Perspektivwechsel zur Nutzung der bestehenden Infrastrukturen einnehmen ..... 362

Empfehlungen ..... 363
2.4 Handlungsfeld: Ressourcenleichtes Verhalten durch Infrastrukturen ermöglichen ..... 364
Empfehlungen ..... 365
2.5 Handlungsfeld: Dilemma aus Flexibilität und Sicherheit akzeptieren: Planung, Umsetzung und Technik ..... 367
Empfehlungen ..... 368
2.6 Handlungsfeld: Noch stärker als bisher auf integrierte Lösungen setzen ..... 369
Empfehlungen: ..... 370
2.7 Handlungsfeld: Rohstoffe – Kreislaufwirtschaft fördern – Umweltfolgen verringern ..... 371
Empfehlungen: ..... 372
2.8 Handlungsfeld: Energiewende beschleunigen und Kohleausstieg forcieren ..... 373
Empfehlungen: ..... 373
2.9 Handlungsfeld: Bei der Infrastrukturplanung die Flächenpotenziale berücksichtigen ..... 374
Empfehlungen: ..... 375
2.10 Handlungsfeld: Informations- und Kommunikationstechnologien als Schlüsseltechnologie begreifen ..... 375
Empfehlungen ..... 376
3 Adressaten der Handlungsempfehlungen und Policy-Mix ..... 378
4 Quellenverzeichnis ..... 380

Teil F: Anhang ..... 390

1 Die SWOT-Matrizen der zehn Infrastrukturteilsysteme ..... 390
1.1 Energieversorgung – SWOT-Analyse der Infrastruktursysteme der Strom-, Wärme- und Gasversorgung ..... 390
1.1.1 SWOT-Analyse der Stromversorgung ..... 390
1.1.2 SWOT-Analyse der Gasversorgung ..... 395
1.1.3 SWOT-Analyse der Wärmeversorgung ..... 398
1.2 Siedlungswasserwirtschaft – SWOT-Analyse der Infrastruktursysteme der Wasserver- und Abwasserentsorgung ..... 404
1.2.1 SWOT-Analyse der Wasserversorgung ..... 404
1.2.2 SWOT-Analyse der Abwasserentsorgung ..... 409
1.3 Verkehr – SWOT-Analyse der Infrastruktursysteme Straßen-, Schienen-, Luftverkehre und Binnenschifffahrt ..... 415
1.3.1 SWOT-Analyse Straße ..... 415
1.3.2 SWOT-Analyse der Schiene ..... 420
1.3.3 SWOT-Analyse der Luftfahrt ..... 425
1.3.4 SWOT-Analyse der Binnenschifffahrt ..... 429

1.4 Informations- und Kommunikationstechnologien – SWOT Analyse der IKT-Infrastruktursysteme ..... 434

2 Mengengerüste im Referenzszenario und den vier Fallstudien ..... 439

2.1 Mengengerüst im Referenzszenario ..... 439

2.2 Mengengerüst Fallstudie „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur“ ..... 454

2.3 Mengengerüst Fallstudie „Kopplung Verkehr - Energie“ ..... 455

2.4 Mengengerüst Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ ..... 457

2.5 Mengengerüst Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ ..... 460

# Abbildungsverzeichnis


Abbildung 1: Die Arbeitspakete im Überblick ..... 31

Abbildung 2: Grundstruktur und Verhältnis der Szenarien im Vorhaben ..... 33

Abbildung 3: Systemgrenze Stromversorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 60

Abbildung 4: Systemgrenze Wärme- und Gasversorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 60

Abbildung 5: Elemente zur Bestimmung der Systemgrenzen Verkehr ..... 61

Abbildung 6: Systemgrenze Straßenverkehrsinfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 62

Abbildung 7: Systemgrenze Schieneninfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 62

Abbildung 8: Systemgrenze Wasserverkehrsinfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 63

Abbildung 9: Systemgrenze Luftverkehrsinfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 63

Abbildung 10: Systemgrenze öffentliche Trinkwasserversorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 65

Abbildung 11: Systemgrenze Abwasserentsorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 65

Abbildung 12: Systemgrenzen IKT-Infrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS ..... 66

Abbildung 13: Struktur des Vorhabens ..... 67

Abbildung 14: Grundstruktur und Verhältnis der Szenarien im Vorhaben ..... 68

Abbildung 15: Methodik Kostenbetrachtung – Beispiel Abwasser ..... 75

Abbildung 16: SWOT Wasserversorgung ..... 80

Abbildung 17: Konsolidierte SWOT-Matrix Wasserversorgung ..... 81

Abbildung 18 : Grundstruktur und Verhältnis der Szenarien im Vorhaben ..... 124

Abbildung 19: Nettostromerzeugung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012) ..... 129

Abbildung 20: Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario – Gesamtübersicht – für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung, 2012 = 100) ..... 136

Abbildung 21: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Energie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ..... 137

Abbildung 22: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb des Infrastrukturbereichs „Energie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ..... 138

Abbildung 23: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Stromversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 139

Abbildung 24: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Wärmeversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 140

Abbildung 25: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Gasversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 141

Abbildung 26: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Wasserver- und Abwasserentsorgung“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ..... 142

Abbildung 27: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb des Infrastrukturbereichs „Wasserver- und Abwasserentsorgung“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ..... 142

Abbildung 28: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Wasserversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 143

Abbildung 29: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Wasserversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 144

Abbildung 30: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Verkehr“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ..... 145

Abbildung 31: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb des Infrastrukturbereichs „Verkehr“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ..... 146

Abbildung 32: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Straßenverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 147

Abbildung 33: Flächeninanspruchnahme (versiegelte Fläche) in ha über die Komponenten des Teilsystems Straßenverkehr ..... 148

Abbildung 34: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Schienenverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 148

Abbildung 35: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Luftverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 149

Abbildung 36: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Wasserverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario ..... 150

Abbildung 37: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Informations- und Kommunikationstechnologie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ....151

Abbildung 38: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen Betrieb des Infrastrukturbereichs „Informations- und Kommunikationstechnologie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100) ....151

Abbildung 39: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Infrastrukturbereichs „Informations- und Kommunikationstechnologie“ im Jahr 2012 im Referenzszenario ....152

Abbildung 40: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur über die Komponenten der Teilsysteme in den Jahren 2012 und 2050 im Referenzszenario ....153

Abbildung 41: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur über die Komponenten der Teilsysteme in den Jahren 2012 und 2050 im Referenzszenario ....154

Abbildung 42: Kapitalkosten im Referenzszenario ....155

Abbildung 43: Vier Fallstudien und Rahmenbedingungen ....159

Abbildung 44: Wirkungsgefüge der Fallstudie „Intelligent gekoppelte Stadttechnik“ ....162

Abbildung 45: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....168

Abbildung 46: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....169

Abbildung 47: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario....170

Abbildung 48: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....171

Abbildung 49: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....171

Abbildung 50: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario....172

Abbildung 51: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....173

Abbildung 52: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050....173

Abbildung 53: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario....174

Abbildung 54: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....175

Abbildung 55: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....175

Abbildung 56: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ für die Energieversorgungsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050....176

Abbildung 57: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ für den Kraftwerkspark im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....177

Abbildung 58: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ für den fossilen Kraftwerkspark im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050....177

Abbildung 59: Kapitalkosten in der Fallstudie 1 „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ ....179

Abbildung 60: Wirkungsgefüge der Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr“ ....184

Abbildung 61: Wirkungsgefüge „Elektrifizierung des Straßenverkehrs“ ....185

Abbildung 62: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....189

Abbildung 63: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....190

Abbildung 64: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario ....191

Abbildung 65: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....192

Abbildung 66: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....192

Abbildung 67: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario ....193

Abbildung 68: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....194

Abbildung 69: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....194

Abbildung 70: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario ....195

Abbildung 71: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....196

Abbildung 72: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....196

Abbildung 73: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ für die Energieversorgungsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....197

Abbildung 74: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ für den Kraftwerkspark und Speicher im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....198

Abbildung 75: Kumulierter Energieaufwand in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich und Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2050 ..... 199

Abbildung 76: Entwicklung der angenommenen Neuzulassungen in den Szenarien ..... 201

Abbildung 77: Kapitalkosten in der Fallstudie 2 „Kopplung Verkehr – Energie“ ..... 204

Abbildung 78: Wirkungsgefüge „Innovationen im Verkehrsbereich“ ..... 209

Abbildung 79: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 213

Abbildung 80: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ..... 214

Abbildung 81: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario ..... 215

Abbildung 82: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 216

Abbildung 83: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ..... 216

Abbildung 84: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario ..... 217

Abbildung 85: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 218

Abbildung 86: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ..... 218

Abbildung 87: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario ..... 219

Abbildung 88: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 220

Abbildung 89: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....220

Abbildung 90: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ für die Verkehrsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....221

Abbildung 91: Endenergieverbrauch im Referenzszenario, Fallstudie2, Fallstudie 3 und der Szenarette im Jahr 2050 ....223

Abbildung 92: Endenergieverbrauch und PtX Umwandlungsverluste im Referenzszenario, Fallstudie2, Fallstudie 3 und der Szenarette im Jahr 2050 ....224

Abbildung 93: Kapitalkosten in der Fallstudie 3 „Innovationen im Verkehr“ ....225

Abbildung 94: Wirkungsgefüge der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ ....230

Abbildung 95: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....235

Abbildung 96: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....236

Abbildung 97: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario ....237

Abbildung 98: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....238

Abbildung 99: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....238

Abbildung 100: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario ....239

Abbildung 101: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....240

Abbildung 102: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050 ....240

Abbildung 103: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario ....241

Abbildung 104: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....242

Abbildung 105: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050....242

Abbildung 106: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ für die IKT-Infrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....243

Abbildung 107: Einsatz kritischer Metalle bei Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ für die IKT-Infrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....244

Abbildung 108: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ für die Verkehrsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....245

Abbildung 109: Gegenüberstellung der Reduktion des KEA durch Bau, Unterhalt Bauaufwendungen und Betrieb Infrastrukturen und der Nettostromerzeugung durch Kohle im Jahr 2050 in dem Fallbeispiel „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ und dem Referenzszenario ....246

Abbildung 110: Gegenüberstellung der Reduktion der THG-Emissionen durch Bau, Unterhalt Bauaufwendungen und Betrieb Infrastrukturen und durch die Nettostromerzeugung durch Kohle im Jahr 2050 in dem Fallbeispiel „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ und dem Referenzszenario ....247

Abbildung 111: Kapitalkosten in der Fallstudie 4 „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ ....248

Abbildung 112: Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung, prozentuale Abweichung des KRA in den Sensitivitäten gegenüber den Szenarien....259

Abbildung 113: Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung, prozentuale Abweichung des KEA in den Sensitivitäten gegenüber den Szenarien....260

Abbildung 114: Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung, prozentuale Abweichung der Treibhausgasemissionen in den Sensitivitäten gegenüber den Szenarien ....260

Abbildung 115: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Ersatzes von grauer durch grüne Infrastruktur im dezentralen Regenwassermanagement“ ....262

Abbildung 116: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung“ ....264

Abbildung 117: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor im Jahr 2050 ....265

Abbildung 118: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Errichtung von Windkraftanlagen als Gitternetztürme“ ....266

Abbildung 119: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Ausbau IKT-Netz langfristig mittels Glasfaser statt Kupfer“ ....268

Abbildung 120: KRA (links) und KEA (rechts) durch Bau und Instandhaltung, Bauaufwendungen und Betrieb für verschiedene Ausbaupfade des Sektors Energie ....269

Abbildung 121: KEA durch Bau und Instandhaltung, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung für verschiedene Ausbaupfade des Sektors Energie ....270

Abbildung 122: KEA (links) und THG (rechts) durch Bau und Instandhaltung, Baustellenaufwand, Betrieb und Nutzung für verschiedene Ausbaupfade des Sektors Energie ....270

Abbildung 123: Empfehlungen im Überblick ....356

Abbildung 124: Empfehlungen nach Dimensionen der Ausgestaltung von Infrastrukturpolitik ....379

# Tabellenverzeichnis


Tabelle 1: Teilschritte der SWOT-Analyse und Bearbeitungsgrundlagen ..... 79

Tabelle 2: Übersicht zur Entwicklung zentraler Rahmenparameter der Szenarien ..... 127

Tabelle 3: Übersicht zur Entwicklung zentraler Rahmenparameter der Szenarien ..... 128

Tabelle 4: KRA, KEA und THG im Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 135

Tabelle 5: Versiegelte Fläche im Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 136

Tabelle 6: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 166

Tabelle 7: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 166

Tabelle 8: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 167

Tabelle 9: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 187

Tabelle 10: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 188

Tabelle 11: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 188

Tabelle 12: Abweichung des Materialbedarfs der neu zugelassenen Fahrzeuge im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario ..... 202

Tabelle 13: KRA, KEA und THG-Emissionen durch Materialbedarfe neu zugelassener Fahrzeuge im Jahr 2050 ..... 203

Tabelle 14: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 211

Tabelle 15: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 212

Tabelle 16: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 212

Tabelle 17: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 233

Tabelle 18: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ..... 234

Tabelle 19: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050 ....234

Tabelle 20: KRA-, KEA- und THG-Emissionen durch Materialbedarfe neuzugelassener Fahrzeuge im Jahr 2050 ....266

Tabelle 21: Übersicht der 20 Best-Practice-Beispiele ....281

Tabelle 22: Kriterien zur Beschreibung der BPB ....282

## Tabellen im Anhang (Teil F)

Tabelle 1: Stärken der Stromversorgung ....390

Tabelle 2 : Schwächen der Stromversorgung ....391

Tabelle 3: Chancen im Zusammenhang mit der Stromversorgung ....393

Tabelle 4: Risiken im Zusammenhang mit der Stromversorgung ....394

Tabelle 5: Stärken der Gasversorgung ....395

Tabelle 6: Schwächen der Gasversorgung ....396

Tabelle 7: Chancen im Zusammenhang mit der Gasversorgung ....397

Tabelle 8: Risiken im Zusammenhang mit der Gasversorgung ....398

Tabelle 9: Stärken der Wärmeversorgung ....399

Tabelle 10: Schwächen der Wärmeversorgung ....400

Tabelle 11: Chancen im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung ....401

Tabelle 12: Risiken im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung ....402

Tabelle 13: Chancen im Zusammenhang mit der Wasserversorgung ....403

Tabelle 14: Stärken der Wasserversorgung ....404

Tabelle 15: Schwächen der Wasserversorgung ....407

Tabelle 16: Risiken im Zusammenhang mit der Wasserversorgung ....408

Tabelle 17: Stärken der Abwasserentsorgung ....409

Tabelle 18: Schwächen der Abwasserentsorgung ....411

Tabelle 19: Chancen im Zusammenhang mit der Abwasserentsorgung ....412

Tabelle 20: Risiken im Zusammenhang mit der Abwasserentsorgung ....413

Tabelle 21: Stärken Straße ....415

Tabelle 22: Schwächen Straße ....417

Tabelle 23: Chancen Straße ....418

Tabelle 24: Risiken Straße ....419

Tabelle 25: Stärken Schiene ....420

Tabelle 26: Schwächen Schiene ....421

Tabelle 27: Chancen Schiene ....423

Tabelle 28: Risiken Schiene ....424
Tabelle 29: Stärken Luftfahrt....425
Tabelle 30: Schwächen Luftfahrt....426
Tabelle 31: Chancen Luftfahrt ....427
Tabelle 32: Risiken Luftfahrt....428
Tabelle 33: Stärke Binnenschifffahrt ....429
Tabelle 34: Schwächen Binnenschifffahrt ....431
Tabelle 35: Chancen Binnenschifffahrt ....432
Tabelle 36: Risiken Binnenschifffahrt....433
Tabelle 37: Stärken der IKT....434
Tabelle 38: Schwächen der IKT....436
Tabelle 39: Chancen im Zusammenhang mit der IKT....437
Tabelle 40: Risiken im Zusammenhang mit der IKT ....438
Tabelle 41: Mengengerüst der Straßenverkehrsinfrastruktur im Referenzszenario ....439
Tabelle 42: Mengengerüst der Schienenverkehrsinfrastruktur im Referenzszenario ....440
Tabelle 43: Mengengerüst der Luftverkehrsinfrastruktur im Referenzszenario....441
Tabelle 44: Mengengerüst der Schifffahrtsinfrastruktur im Referenzszenario ....442
Tabelle 45: Mengengerüst IKT Infrastruktur im Referenzszenario ....443
Tabelle 46: Mengengerüst Kraftwerkspark im Referenzszenario ....444
Tabelle 47: Mengengerüst Stromnetz im Referenzszenario....445
Tabelle 48: Mengengerüst Gasnetz im Referenzszenario....446
Tabelle 49: Mengengerüst Wärmenetz im Referenzszenario....448
Tabelle 50: Mengengerüst Wasserversorgung im Referenzszenario....449
Tabelle 51: Mengengerüst Abwasserentsorgung im Referenzszenario....451
Tabelle 52: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur“ ....454
Tabelle 53: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kopplung Verkehr - Energie“; Energieversorgungsinfrastruktur....455
Tabelle 54: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kopplung Verkehr - Energie“; Verkehrsinfrastruktur ....456
Tabelle 55: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Straßenverkehrsinfrastruktur ....457

Tabelle 56: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Schienenverkehrsinfrastruktur ....458

Tabelle 57: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Luftverkehrsinfrastruktur ....459

Tabelle 58: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Informations- und Kommunikationsinfrastruktur ....459

Tabelle 59: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Straßenverkehrsinfrastruktur ....460

Tabelle 60: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Energieversorgungsinfrastruktur ....460

## Übersichtsverzeichnis

Übersicht 1: Übersicht der Wettbewerbsformen/-intensitäten entlang der Wertschöpfungsketten in Sektoren der Daseinsvorsorge ....86

Übersicht 2: Übersicht der Wettbewerbsformen/-intensitäten entlang der Wertschöpfungsketten in den Teilsystemen im Verkehr ....87

Übersicht 3: Aufgaben und Maßnahmen der Stadt Zürich zur optimierten Nutzung von RC-Beton ....349

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| **Abs.** | Absatz |
| **AEUV** | Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union |
| **AGFW** | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. |
| **AMS** | Aktuelle-Maßnahmen-Szenario |
| **Art.** | Artikel |
| **ASUE** | Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch |
| **ATT** | Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren |
| **AW** | Abwasser |
| **BBSR** | Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung |
| **BDEW** | Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft |
| **BEV** | batterieelektrische Fahrzeuge |
| **BHKW** | Blockheizkraftwerk |
| **BIP** | Bruttoinlandsprodukt |
| **BITKOM** | Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien |
| **BMI** | Bundesministerium des Innern |
| **BMUB** | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| **BMVI** | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur |
| **BMWi** | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| **BNetzA** | Bundesnetzagentur |
| **BPB** | Best-Practice-Beispiel |
| **B-Plan** | Bebauungsplan |
| **BSch** | Binnenschifffahrt |
| **bspw.** | Beispielsweise |
| **BSW-Solar** | Bundesverband Solarwirtschaft |
| **BVWP** | Bundesverkehrswegeplan |
| **bzw.** | Beziehungsweise |
| **CBA** | Cost-benefit analysis |
| **CETA** | Comprehensive Economic and Trade Agreement |
| **DAV** | Deutscher Asphaltverband |
| **DAWI** | Dienstleistungen von allgemeinem wirtschaftlichen Interesse |
| **DBVW** | Deutscher Bund verbandlicher Wasserwirtschaft e. V. |
| **d.h.** | das heißt |
| **DWA** | Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. |
| **DVGW** | Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. |

| | |
|---|---|
| **EE** | erneuerbare Energien |
| **EG** | Europäische Gemeinschaft |
| **EGS** | Ecosystem Goods and Services |
| **e-MIV** | elektrisch-motorisierter Individualverkehr |
| **EntflechtG** | Entflechtungsgesetz, Gesetz zur Entflechtung von Gemeinschaftsaufgaben und Finanzhilfen |
| **et al.** | et alii/aliae/alia |
| **etc.** | et cetera |
| **EVU** | Energieversorgungsunternehmen |
| **EW** | Einwohner |
| **Fraunhofer ISI** | Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung |
| **Fraunhofer ISE** | Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme |
| **G** | Gasversorgung |
| **GG** | Grundgesetz |
| **ggf.** | Gegebenenfalls |
| **GuD-Kraftwerk** | Gas und Dampfkraftwerk |
| **GVFG** | Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz |
| **HELCOM** | Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area). |
| **HWWI** | Hamburgisches Weltwirtschaftsinstitut |
| **i.d.R.** | in der Regel |
| **ifeu** | Institut für Energie- und Umweltforschung |
| **IKT** | Informations- und Kommunikationstechnologien |
| **IuK-Infrastruktur** | Informations- und Kommunikationsinfrastruktur |
| **KEA** | Kumulierter Energieaufwand |
| **KEP-Dienst** | Kurier-, Express- und Paket-Dienst |
| **KfW** | Kreditanstalt für Wiederaufbau |
| **KLIWAS** | Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen |
| **KOM** | Europäische Kommission |
| **KRA** | Kumulierter Rohstoffaufwand |
| **KS** | Klimaschutzszenario |
| **KWK** | Kraft-Wärme-Kopplung |
| **LNG** | liquefied natural gas |
| **Lkw** | Lastkraftwagen |
| **Lu** | Luftverkehr |
| **Mio.** | Millionen |

| | |
|---|---|
| **MIV** | Motorisierter Individualverkehr |
| **MaRess** | Projekt „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ |
| **NASS** | Neuartige Sanitärsysteme |
| **NEP** | Netzentwicklungsplan |
| **o.g.** | oben genannt |
| **ÖPNV** | Öffentlicher Personennahverkehr |
| **PHEV** | Plug-In-Fahrzeug |
| **Pkw** | Personenkraftwagen |
| **PtG** | Power-to-Gas, Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen zur Gasherstellung |
| **PtH** | Power-to-Heat, Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen zur Wärmeerzeugung |
| **PtL** | Power-to-Liquid, Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen zur Herstellung von Flüssig-kraftstoffen oder flüssigen Ausgangsstoffen für die chemische Industrie |
| **PtX** | Power-to-X, Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen zur Bereitstellung anderer Energie-formen wie Wärme, Gas oder längerkettige Kohlenwasserstoffe |
| **PV** | Photovoltaik |
| **REEV** | Elektrofahrzeuge mit Range Extender |
| **RELIS** | Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest (Projekttitel) |
| **RStO** | Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen |
| **Rz.** | Randziffer |
| **S.** | Seite |
| **Sch** | Schienenverkehr |
| **SCR** | Selektive Katalytische Reduktion |
| **St** | Strom |
| **Stra** | Straßenverkehr |
| **SWOT** | Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats |
| **TEMPS** | Transport-Emission & Policy Scenario |
| **THG** | Treibhausgas |
| **TTIP** | *Transatlantic Trade and Investment Partnership* |
| **TW** | Trinkwasser |
| **u.a.** | unter anderem |
| **UBA** | Umweltbundesamt |
| **VDI** | Verein Deutscher Ingenieure |
| **VDV** | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. |
| **vgl.** | Vergleiche |
| **VKU** | Verband kommunaler Unternehmen e.V. |
| **Wä** | Wärmeversorgung |

| | |
|---|---|
| **WSV** | Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes |
| **z. B.** | zum Beispiel |
| **z. T.** | zum Teil |

## Zusammenfassung

Technische Infrastruktursysteme der Ver- und Entsorgung mit Energie, Wasser/Abwasser, der Mobilität und der Informations- und Kommunikationstechnologien sind fundamental für das Leben in modernen Gesellschaften. Über diese Infrastruktursysteme werden enorme Stoffströme sowie Informationen und Güter „bewegt". Sie erschließen Räume, erfassen Umweltressourcen (z. B. Wasser, Gas), wandeln diese um, transportieren sie zum Ort des gesellschaftlichen Bedarfs und machen sie damit verfügbar und nutzbar. Infrastruktursysteme sind nicht nur als Instrumente der Umwandlung und Nutzbarmachung natürlicher Ressourcen relevant. Sie selbst nehmen beim Bau und ihrem Betrieb vielfältige und enorme Mengen an Umweltressourcen in Anspruch. Errichtung, Betrieb und Instandhaltung von technischen Infrastrukturen sind ressourcenintensiv. Für den weiteren Ausbau, die Sanierung und die Instandhaltung werden jährlich große Mengen an unterschiedlichen Materialien eingesetzt. Nur ein Bruchteil der benötigten Materialien wird im Zuge von Recycling aus den technischen Infrastrukturen selbst gewonnen. Im Laufe der Zeit entstand dadurch ein beträchtliches sogenanntes anthropogenes Lager im Infrastrukturbestand, das sich weiterhin im Wachstum befindet. So betrug zum Ende der „Nuller-Jahre" dieses Jahrhunderts[1] der in Verkehrs-, Wasser-/Abwasser- und Energieinfrastrukturen enthaltene Materialbestand an Beton schätzungsweise ca. 832,2 Mio. t, Stahl/Eisen 91,8 Mio. t, Kupfer 4,2 Mio. t, Aluminium 2,2 Mio.t. Jährlich kommen für diese drei Infrastrukturbereiche 9,8 Mio. t Beton, 1,4 Mio. t Stahl/Eisen, 48.000 t Kupfer und 44.000 t Aluminium hinzu (Steger et al. 2011). Verbunden mit den zum Teil jahrzehntelangen Lebensdauern technischer Infrastrukturen wachsen die von Menschen geschaffenen Lagerstätten perspektivisch noch weiter an. Da einige Rohstoffe selten sind, zunehmend knapper und teurer werden, ist ein schonender Umgang mit denselben – auch im Bereich Infrastrukturen – nicht nur aus ökologischen Gründen anzustreben, sondern auch ökonomisch geboten.

Zudem sind technische Infrastrukturen und deren Unterhalt ein erheblicher Kostenfaktor für die öffentliche Hand und/oder die Nutzer.

Da Errichtung, Betrieb, Instandhaltung und Reparatur von technischen Infrastrukturen einen erheblichen Anteil am gesellschaftlichen Materialinput aufweisen, kann ihre zukunftsfähige und ressourcenleichte Gestaltung einen erheblichen Beitrag für die Umsetzung von Ressourceneffizienz- und Nachhaltigkeitspolitik leisten.

Sie sind daher unter Umwelt-, Klima- und Nachhaltigkeitsgesichtspunkten von besonderem Interesse. Entsprechend fügt sich das Projekt „Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest" (RELIS) in den von der Bundesregierung mit dem Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (2002), dem Ressourceneffizienzprogramm (ProgRress 2012), dem Energiekonzept (2010), dem Aktionsprogramm Klimaschutz (2014) sowie dem von der Bundesregierung am 5.10.2106 ratifizierten Pariser Klimaschutzabkommen aufgespannten Zielrahmen ein. Vor diesem Hintergrund sowie dem verschiedener sogenannter „Megatrends" wird seit einigen Jahren verstärkt die Frage nach Formen und der Gestaltung zukunftsfähiger Infrastrukturen gestellt. Demografischer Wandel und Klimawandel wirken hier genauso wie gesellschaftlicher und technologischer Wandel und Innovation. Die Dekarbonisierung und in Deutschland der grundlegende Umbau der Energieversorgung im Rahmen der „Energiewende" sind maßgebliche Ziele, was Fragen nach der zukünftigen Gestaltung und Funktion von technischen Infrastruktursystemen aufwirft. Dabei wird – ausgehend von den klassischen Prinzipien der Daseinsvorsorge wie Universalität, Erschwinglichkeit, Zugänglichkeit – ein Reigen weiterer Anforderungen aufgespannt. Genannt seien beispielhaft Resilienz (die Fähigkeit, bei eingetretenen Störungen – z. B. durch externe Einwirkung, Überlastung oder Defekte – den Zusam-

1 Eine exakte Jahreszahl kann nicht angegeben werden, da die Bezugsjahre der Quellen für die Materialbestände in den einzelnen Sektoren zum Teil voneinander abweichen. Die Quellen beziehen sich auf die Jahre 2005 bis 2009.

menbruch bzw. Ausfall von technischen Infrastrukturen abzuwenden und zeitnah in einen akzeptablen Zustand zurückzubringen), Flexibilität, Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz. Diesen Begriffen gegenüber ist „Ressourcenleichtigkeit“ ein vergleichsweise neu eingeführter Begriff, für den es bisher keine festgelegte Definition gibt.

Mit ressourcenleicht ist im Kontext des Vorhabens RELIS die Minimierung von Ressourcenverbrauch während des gesamten Lebenszyklus von Infrastrukturen, d. h. Errichtung, Betrieb, Instandhaltung (Bau und Unterhalt), Rückbau und Entsorgung, gemeint. Als Ressourcen werden Materialien, Energie und Fläche betrachtet.

Infrastruktursysteme sind einerseits eine Voraussetzung für Wirtschaft und Gesellschaft und wirken somit auf diese ein. Andererseits werden Infrastruktursysteme aufgrund von Entscheidungen in Wirtschaft und Gesellschaft geplant, umgesetzt und finanziert. Insofern sind Infrastruktursysteme komplexe sozioökonomische und sozio-technische Systeme mit schwer voneinander abgrenzbaren technischen, wirtschaftlichen und institutionellen Subsystemen. Umweltbedingungen prägen diese maßgeblich.

Im Rahmen dieses Vorhabens werden in einer möglichst ganzheitlichen Sicht die vielfältigen Facetten und Dimensionen infrastruktursystemübergreifend in den Blick genommen. Die technischen Infrastrukturen werden damit systemisch und sektorenübergreifend betrachtet, um mögliche Synergien zwischen verschiedenen Infrastrukturen sowie mit anderen Politikfeldern erschließen zu können. Das übergeordnete **Ziel** des Forschungsvorhabens RELIS ist es, Handlungsempfehlungen für eine ressourcenleichte und zukunftsfähige Gestaltung der technischen Infrastruktursysteme Energie, Verkehr, Wasser/Abwasser sowie Informations- und Kommunikationstechnologien zu entwickeln. Dabei sind wesentliche Veränderungsprozesse und Zukunftstrends wie etwa der demografische und Klimawandel, volatile und tendenziell steigende Rohstoffpreise, technologischer Wandel, ökonomischer Strukturwandel und gesellschaftlicher Wandel zu berücksichtigen. Dabei sollte die ressourcenleichte Gestaltung der genannten Infrastrukturen jedoch deren Funktionsfähigkeit ebenso wenig beeinträchtigen wie ihre Robustheit gegenüber negativen äußeren Einwirkungen und Funktionsstörungen etwa durch temporäre Über- oder Unterlast. Ferner müssen die Infrastruktursysteme langfristig ökonomisch tragfähig sein. Dieses mehrdimensionale Zielsystem der Infrastrukturgestaltung bildet die Hintergrundfolie des Vorhabens.

**Gegenstand** der Untersuchung sind die folgenden „technischen Basisinfrastrukturen“ (BMI 2009, S. 5) der Daseinsvorsorge in Deutschland:

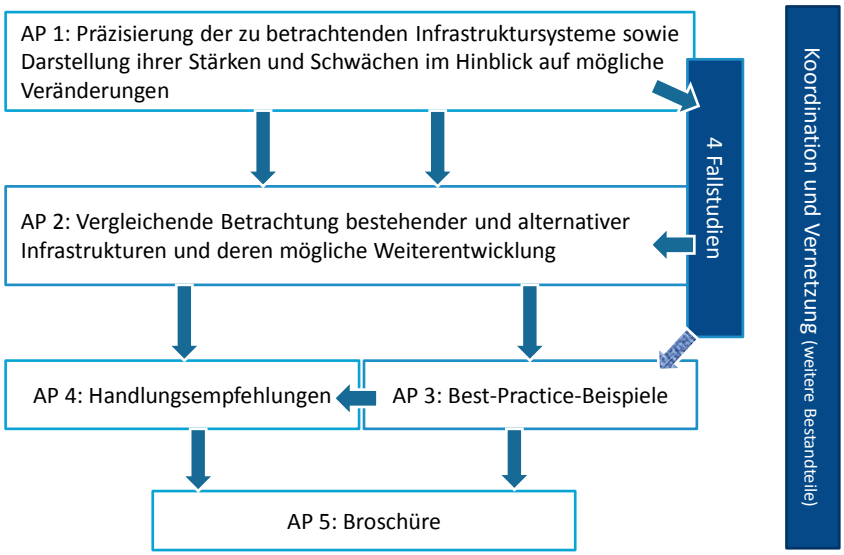
- Verkehrsinfrastrukturen: Straße, Schiene, Binnenwasserstraßen, Luft;
- Energieversorgung: Strom, Wärme, Gas;
- Siedlungswasserwirtschaft: Wasserver- und Abwasserentsorgung;
- Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT).

Die Infrastruktursysteme werden aufgrund ihrer vielfältigen Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten nicht einzeln betrachtet. Unter dem Stichwort „Sektorkopplung“ werden aktuell etwa im Zuge der Energiewende-Debatte neue oder sich verstärkende, bekannte Kopplungen zwischen Sektoren und Infrastruktursystemen diskutiert. Mit Blick auf die eingangs formulierten Ziele des Vorhabens besteht eine Aufgabe darin, die verschiedenen und vielfältigen Aspekte und Faktoren in der Anpassung, Entwicklung und Transformation von Infrastrukturen zu sortieren und zu systematisieren, um sektorenübergreifend zu einem Gesamtbild und Empfehlungen für die zukünftige Infrastrukturgestaltung zu kommen.

### Vorgehen und methodische Grundlagen

Im Vorhaben RELIS werden quantitative und qualitative Methoden und Ansätze verschnitten. Grundlegend baut das Vorhaben auf einem Vergleich verschiedener Szenarien mit dem Zeithorizont 2050 auf. Einem Referenzszenario („Aktuelle Maßnahmen“) werden normative Szenarien ressourcenleichter Infrastrukturen („Fallstudien“) gegenübergestellt und mithilfe von Ergebnissen einer orientierenden Stoffstromanalyse und Kostenabschätzungen sowie qualitativen Analysen ausgewertet. Zu diesem Zweck wurde im ersten Schritt eine umfangreiche Bestandsaufnahme der Infrastruktursysteme vorgenommen und eine SWOT-Analyse (Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken) der Infrastruktursysteme und ihrer Teilsysteme durchgeführt. Flankiert bzw. untermauert werden die Ergebnisse von einer Zusammenstellung von Best-Practice-Beispielen im Untersuchungsfeld. In der Gesamtschau der Ergebnisse werden Empfehlungen zur Gestaltung ressourcenleichter zukunftsfähiger Infrastrukturen entwickelt, die mit Maßnahmen und Instrumenten hinterlegt sind.

Abbildung 1: Die Arbeitspakete im Überblick




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die quantitative Auswertung der Szenarien erfolgt mittels einer orientierenden Stoffstromanalyse, mit der Aussagen zur Inanspruchnahme von Rohstoffen, Energie und Flächen möglich sind. Die orientierende Stoffstromanalyse der Infrastrukturen bezieht sich auf deren gesamten Lebenszyklus und umfasst damit die quantitative Analyse von Errichtung/Bau und Instandhaltung (Wartung, Reparatur), Betrieb und Rückbau der Infrastrukturen. Die Nutzung der besonders relevanten Infrastrukturen wird durch die Systemgrenzen zwar ausgeschlossen, nichtsdestotrotz aber für die wichtigen Bereiche in Exkursen mit aufgenommen.

Die folgenden Wirkungskategorien werden in der orientierenden Stoffstromanalyse berücksichtigt:

- **Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)** als die Summe aller in ein System eingehender Rohstoffe, ausgedrückt in Gewichtseinheiten (kg/Tonne);
- **Kumulierter Energieaufwand (KEA)** als eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Energieressourcen (Primärenergien) im Zusammenhang der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder einer Dienstleistung (z. B. in MJ/Tonne);

- Schadstoffe, die zur zusätzlichen Erwärmung der Erdatmosphäre beitragen, werden unter Berücksichtigung ihres Treibhauspotenzials bilanziert, welches das Treibhauspotenzial des Einzelstoffs relativ zu Kohlenstoffdioxid kennzeichnet. Als Indikator wird das **Gesamttreibhauspotenzial in $CO_2$-Äquivalenten (THG)** angegeben (in kg $CO_2$-äq./Tonne). Darüber hinaus erlauben es die Inputgrößen der Bestandsaufnahme, die **Flächeninanspruchnahme** der Infrastrukturteilsysteme darzustellen.

Für die Durchführung der Stoffstromanalysen wurde ein Excel-Tool entwickelt.

Die Methodik der orientierenden Stoffstromanalyse, der Kostenabschätzung und der qualitativen Ansätze zur Konzeption und Einschätzung der Fallstudien ist in Teil A des Berichts ausführlich dargelegt.

Für vertiefende Untersuchungen der Fallstudien wurden fünf qualitative Kriterien herangezogen: gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe von Bürgerinnen und Bürgern, Flexibilität, Reversibilität und Resilienz. In diesen fünf Kriterien bilden sich insbesondere die vom Umweltbundesamt gesetzten Systemeigenschaften ab. Denn die Infrastruktursysteme im Jahr 2050 sollen nicht nur „ressourcenleicht“ und „zukunftsfähig“ sein, sondern zudem „umweltschonend“, „demografiefest“ und „robust“ (vgl. Vorhabentitel). Durch vertiefende Untersuchungen wurde gewährleistet, dass die aus den Analysen der Fallstudien abgeleiteten Handlungsempfehlungen nicht allein auf quantitativen Ergebnissen der Stoffstromanalyse gründen, sondern ausgehend von der Definition von Infrastrukturen als sozio-technische Systeme systemisch begründet sind.

**Rahmenbedingungen und Trends**

Infrastrukturen als sozio-technische Systeme unterliegen einer Reihe von sich verändernden Rahmenbedingungen und Zukunftstrends, die zur Analyse der Umgestaltungsmöglichkeiten in den Blick zu nehmen sind. Zu den für technische Infrastruktursysteme maßgeblichen **Veränderungsprozessen** („Megatrends“) gehören insbesondere (vgl. u.a. Libbe/Köhler/Beckmann 2010):

- demografischer Wandel,
- Verknappung fossiler Brennstoffe sowie teilweise abnehmende Ressourcenverfügbarkeit und daraus folgende Preissteigerungen,
- Klimawandel und Maßnahmen zum Klimaschutz,
- siedlungsstruktureller Wandel und zunehmende räumliche Disparitäten,
- gesellschaftlicher Wandel (u.a. Individualisierung und Ausdifferenzierung der Sozialstruktur, Lebensstile),
- finanzielle Handlungsspielräume der öffentlichen Hand, insb. Kommunen,
- technologischer Wandel, schnellere Innovations- und Produktzyklen, Digitalisierung.

Absehbare bzw. bereits eingeläutete Trends, die sich über verschiedene Infrastruktursektoren hinweg identifizieren lassen:

- neuartige bzw. sich vertiefende Kopplungen zwischen verschiedenen Infrastrukturbereichen/-sektoren („Sektorkopplung“): Abwasser – Energie, IKT – Energie, Energie – Verkehr;
- Sensibilität und Augenmerk für das Thema Kritikalität, Vulnerabilität und Resilienz von (kritischen) Infrastrukturen (BMI 2009);
- Sensibilität für Umgang mit Unsicherheiten in der Planung von langlebigen, technischen Infrastruktursystemen;
- veränderte Anforderungen an bzw. Prinzipien für die Gestaltung von Infrastruktursystemen wie etwa Ressourceneffizienz, Flexibilität, Adaptionsfähigkeit und Resilienz (vgl. Kluge/Libbe 2006, Libbe/Petschow 2015).

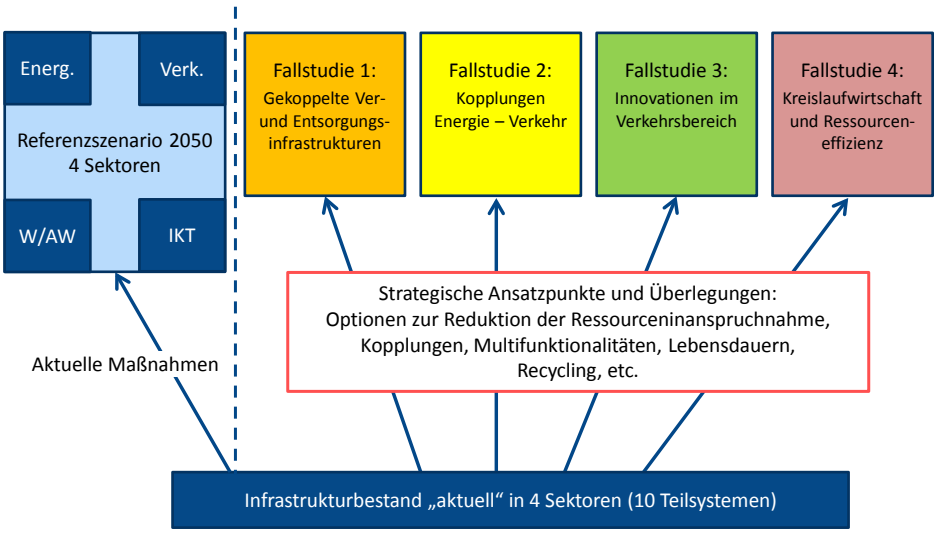
Vor diesem Hintergrund lassen sich sektorenspezifische Optionen und strategische Ansatzpunkte identifizieren, die zur ressourcenleichten Gestaltung der Infrastrukturen beitragen können. Die Optionen können sowohl technischer Art sein, sie können sich aber auch auf veränderte institutionelle Arrangements (u.a. Governance, ökonomische Mechanismen) beziehen. Dabei gilt zu beachten, dass die meisten Optionen (außer reine Suffizienz-Strategien) nicht gleichermaßen zur Reduktion der Inanspruchnahme aller betrachteten Ressourcen führen, so dass (letztlich nur kontextspezifisch) über die Auswahl von Optionen fachlich und politisch zu entscheiden ist.[2]

### Szenarien

Im Vorhaben RELIS wurden einem Referenzszenario vier Alternativszenarien („Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen") gegenübergestellt. Alle fünf Szenarien gehen vom selben Infrastrukturbestand in den vier Sektoren im Jahr 2012 aus. Der heute gegebene Infrastrukturbestand wird dann in den einzelnen Szenarien unter verschiedenen Annahmen und mit in den Szenarien abgebildeten Maßnahmen zu einem künftigen Infrastrukturbestand in den Jahren 2030 und 2050 weiter entwickelt. Im Referenzszenario werden „aktuelle Maßnahmen" aufgegriffen und abgebildet. In den Alternativszenarien werden verschiedene Ansatzpunkte und Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme in Fallstudien modelliert.

Entwicklung und das Verhältnis der Szenarien zueinander kann in der in Abbildung 2 dargestellten Grundstruktur abgebildet werden.

Abbildung 2: Grundstruktur und Verhältnis der Szenarien im Vorhaben




Quelle: Difu/Öko-Institut.

2 Beispielsweise können dezentrale Optionen der Stromerzeugung möglicherweise Netzausbaubedarf vermeiden, sie führen aber in anderen Bereichen zu zusätzlichem Ressourcenbedarf, zum Beispiel wenn zusätzliche Kraftwerke oder Speicher in bestimmten Regionen installiert werden müssen.

**Das methodische Vorgehen „kurz gefasst“**

Das Referenzszenario ist als „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario“ angelegt. Das heißt:

- Kein „BAU-Szenario“.
- Referenzszenario orientiert sich technologisch an gemäßigten Modernisierungs-/Optimierungspfaden.
- Referenzszenario baut auf gemeinsamen, d. h. auf für alle Infrastrukturbereiche gültigen, Metaparametern auf (Demografie, Wirtschaftsentwicklung u.a.m.).
- Grundlage: Studien „Klimaschutzszenario 2050“ des Öko-Instituts und Fraunhofer ISI, hier sind Szenarien mit verschiedenen klimapolitischen Ambitionsniveaus für den Zeithorizont bis 2050 („Aktuelle-Maßnahmen-2012“, KS 80, KS 90) angelegt (vgl. Repenning et al. 2015).
- Kern der zugrunde gelegten Klimaschutzszenario-Studie ist das Energiekonzept der Bundesregierung.
- Differenzierungen erfahren die Referenzszenarien durch sektorenspezifische Annahmen.

Die Fallstudien „ressourcenleichter Infrastrukturen“ sind als Alternativszenarien im Kontrast zum Referenzszenario angelegt. Sie zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

- Die in den Alternativszenarien angenommenen Metaparameter (Demografie, Wirtschaftsentwicklung u.a.m.) entsprechen denen in den Referenzszenarien.
- Sie integrieren verschiedene Infrastruktursysteme und Sektoren.
- Sie sind mehr als die Implementation technischer Einzeloptionen zur Optimierung.
- Die den Alternativszenarien zugrunde liegenden Maßnahmensets und Strategiepakete sind so „gestrickt“, dass sie eine Ressourcenleichtigkeit vermuten lassen.
- Fokussierung des Zielsystems in diesen Szenarien auf normative Ausrichtung des Vorhabens.

Die im Rahmen der Szenarien getroffenen Annahmen sind in Teil C des Berichts detailliert eingeführt und im Anhang in differenzierten Bestandsentwicklungen ausgewiesen. Hinter den Annahmen der Entwicklung des Infrastrukturbestands stehen auch Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Bedarfe an Infrastrukturdienstleistungen.

Grundlegend baut das Referenzszenario auf der „Klimaschutzstudie 2050“ („Aktuelle-Maßnahmen-Szenario 2012“) auf (Repenning et al. 2015). Die Fallstudien „ressourcenleichter Infrastrukturen“ wurden aufbauend auf

- dem Infrastrukturbestand in Deutschland im Jahr 2012,
- den sektorenspezifischen Untersuchungen,
- SWOT-Analysen (Stärken/Schwächen/Chancen/Risiken),
- als plausibel erachteten strategischen Ansatzpunkten zur Beeinflussung der Ressourceninanspruchnahme durch die Infrastruktursysteme und auf
- durch Literaturrecherchen gestützte Annahmen über die weitere Entwicklung von Trends und Veränderungsprozessen in den Infrastruktursektoren entwickelt.

Die Fallstudien bilden mögliche Gestaltungen („Szenen“) künftiger Infrastrukturen im Jahr 2050 ab und werden normativ auf „Ressourcenleichtigkeit“ hin gestaltet. Es geht nicht darum, möglichst wahrscheinliche Entwicklungen abzubilden. Die Funktionsfähigkeit der Infrastrukturen und die heute geltenden Prinzipien der Daseinsvorsorge werden mit den Fallstudien nicht in Frage gestellt.

Darüber hinaus werden teilweise auch die als „Nutzung“ bezeichneten Auswirkungen der Stromerzeugung mit fossilen Erzeugungsanlagen dargestellt.

Im Ergebnis wurden folgende vier Fallstudien für die Entwicklung „ressourcenleichter, zukunftsfähiger Infrastrukturen“ entworfen (Teil C, Kapitel 5):

1. Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen,
2. Kopplung Energie – Verkehr,
3. Innovationen im Verkehrsbereich,
4. Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz.

Um fundierte Empfehlungen zur Gestaltung und Weiterentwicklung ressourcenleichter Infrastrukturen ableiten zu können, sind über eine orientierende Stoffstromanalyse und Kostenabschätzung (Teil C, Kapitel 5) hinausgehende, vertiefende Untersuchungen (Teil C, Kapitel 6) zielführend. Entsprechend ist **Hemmnissen** für eine Weiterentwicklung oder gar einen grundlegenden Systemwechsel der Infrastrukturen dezidiert nachzugehen. Da Infrastrukturen über lange Nutzungs- und Abschreibungszeiträume verfügen und somit entsprechende technisch-ökonomische Pfadabhängigkeiten bestehen, ist es wichtig, für die Systemanpassung bzw. -weiterentwicklung günstige **Zeitfenster** zu identifizieren. Über diese Fragen hinaus werden **Sensitivitätsanalysen** für zentrale Annahmen und Komponenten in den Wirkungsgefügen der Fallstudien berechnet und **Szenaretten** für Kombinationen der Fallstudien[3] bzw. anderer Zuschnitte derselben modelliert. Damit können nicht nur Annahmen überprüft, sondern auch Schlüsselelemente für die Gestaltung und Weiterentwicklung ressourcenleichter Infrastrukturen identifiziert werden.

#### Schlussfolgerungen aus den Analysen der Szenarien

Die folgenden Ergebnisse der Untersuchungen im Vorhaben RELIS sind sortiert nach Erkenntnissen in Bezug auf (1) die Ressourceninanspruchnahme, (2) die Kostenabschätzungen, (3) die Gestaltung von ressourcenleichten Infrastrukturen und (4) methodische Hinweise und Erkenntnisse aus der Bearbeitung.

1. Ergebnisse in Bezug auf die Ressourceninanspruchnahme:
   - Der aktuelle Bestand an technischer Infrastruktur in Deutschland ist enorm. Im Infrastrukturbestand ist ein umfangreiches anthropogenes Lager mit einem damit verbundenen großen „Materialien-, Energie- und Flächenrucksack“ angelegt. Der hohe aktuelle Bestand wird auch zukünftig zu einer hohen Ressourceninanspruchnahme führen. In vielen Infrastrukturbereichen (z. B. Straßennetz, Infrastruktur der Informations- und Kommunikationstechnologie) wird ein weiterer Netzausbau diese zukünftige Ressourceninanspruchnahme weiter erhöhen.
   - Auch zeigen die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse, dass es eine Reihe von Maßnahmen gibt, mit denen sich die Ressourceninanspruchnahme (KRA, KEA, THG und Flächeninanspruchnahme) der Infrastruktursysteme verringern lässt. Dabei ist es wichtig, den gesamten Lebenszyklus (Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb, Rückbau/Entsorgung) der Infrastruktur im Blick zu behalten. Teilweise führen die umgesetzten Maßnahmen bei Bau und Unterhalt der Infrastruktur zu einer höheren Ressourceninanspruchnahme (vgl. die Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“), ermöglichen jedoch auf Seiten des Betriebes eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs. In anderen Fällen werden zwar Einsparungen auf Seiten der Treibhausgasemissionen erreicht, bei den anderen betrachteten Wirkungskategorien erhöhen sich hingegen die Ressourcenverbräuche, so dass bei der (Um-) Gestaltung der Infrastruktursysteme Zielkonflikte bestehen können.
   - In Bezug auf Bau und Unterhalt der Infrastruktursysteme zeigt sich, dass in den gewählten Konstellationen der Fallstudien die Veränderungen der Ressourcenparameter zur Erfassung

[3] So wurden beispielsweise die beiden Fallstudien zur Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkten Elektrifizierung miteinander verschnitten.

der Ressourceninanspruchnahme im Vergleich der verschiedenen Szenarien in der Gesamtbetrachtung der Ergebnisse und auf dem hochaggregierten Niveau auf den ersten Blick teilweise gering sind. Bei einer genaueren Betrachtung der Details in den einzelnen Sektoren und Teilsystemen zeigen sich jedoch interessante Unterschiede zwischen den Szenarien. Der Verkehrssektor besitzt an allen betrachteten Wirkungskategorien den größten Anteil. Innerhalb des Verkehrssektors wiederum schlagen die Straßenverkehrsinfrastrukturen am stärksten zu Buche. Die Ressourceninanspruchnahme durch die Energieinfrastrukturen hängt stark mit den Energiebedarfen zusammen. Die Infrastrukturen der Siedlungswasserwirtschaft sind aufgrund ihrer vergleichsweise langen Nutzungsdauer (v.a. in den Netzen) einerseits (bilanziell) vergleichsweise ressourcenleicht, andererseits relativ stabil in ihrer Gestaltung. Die IKT-Infrastrukturen repräsentieren in den Parametern sehr geringe Anteile.

- Die durch den Ausbau der Infrastruktur bedingte Ressourceninanspruchnahme muss nicht zwangsläufig negativ bewertet werden. So können Infrastrukturen auch die Grundlage für eine ressourcenleichte Nutzung der Infrastrukturen darstellen (z. B. Ausbau der Schienenverkehrsinfrastruktur ermöglicht einen energieeffizienteren Verkehr) oder ein ressourcenleichtes Verhalten ermöglichen (z. B. Ausbau der IKT-Infrastruktur ermöglicht multimodale Mobilität). Auf Seiten der Nutzung können ggf. deutlich höhere Potenziale zur Ressourcenleichtigkeit gehoben werden, als durch die Infrastruktur an sich an (zusätzlicher) Ressourceninanspruchnahme verursacht wird. Damit dienen, wie insbesondere die Fallstudien „Verkehr – Energie“ und „Innovationen im Verkehrsbereich“ sowie die Szenarette 2 zeigen, Infrastrukturen als „Ermöglicher“ für ressourcenleichten Betrieb und Nutzung.
- Aufgrund der hohen Anteile der Straßenverkehrsinfrastruktur an der gesamten Ressourceninanspruchnahme besitzen dort umgesetzte Maßnahmen eine hohe Wirkmächtigkeit. Dies verdeutlichen die Ergebnisse in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“. Die in dieser Fallstudie angelegten Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft (Recycling) für die Baumaterialien (insb. Asphalt) der Infrastrukturen zeigen hohe Potenziale für mehr Ressourcenleichtigkeit, insbesondere in Hinblick auf den kumulierten Energieaufwand. Die verstärkte Verwendung von Sekundärmaterial (z. B. Asphalt, Kupfer) und die Erhöhung der Nutzungsdauern können demnach helfen, den jährlichen Ressourcenaufwand zu reduzieren. Dieser Aspekt ist von besonders hoher Relevanz, weil sich Potenziale nicht nur in allen sich verändernden Infrastrukturbeständen (z. B. Netzerweiterungen) auswirken, sondern fast der gesamte Bestand durch die Instandhaltung und Erneuerung adressiert wird.
- Von besonderer Bedeutung ist die Umgestaltung der Infrastruktur der Energieversorgungssysteme. Diese Umgestaltung ist in einem beschränkten Maße bereits im Referenzszenario angelegt. Dies führt auf der Seite des Betriebes der Energieversorgungsinfrastruktur zu einer reduzierten Ressourceninanspruchnahme durch den zurückgehenden Bestand an Braun- und Steinkohlekraftwerken. Der Betrieb spiegelt in diesem Fall die mit der Höhe des Eigenverbrauchs verbundenen fossilen Energieträger wider. Der Ausbaupfad von Erneuerbare-Energie-Erzeugungsanlagen schlägt sich auch auf die anderen Infrastrukturbereiche durch, bei denen der im Bau und Betrieb eingesetzte Strom ressourcenleichter wird. Im Ergebnis führt ein schnellerer Rückgang an fossilen Erzeugungsanlagen in den Fallbeispielen zu akkumulierten Emissionsminderung von 40 bis 90 Mio. Tonnen $CO_2$-Äquivalenten.

2. Ergebnisse in Bezug auf die Kostenabschätzung:
   - Die Kostenabschätzungen für die einzelnen Szenarien zeigen, dass in keiner der modellierten Fallstudien gegenüber dem Referenzszenario Kostenentwicklungen zu erwarten sind, die einer Weiterentwicklung in der beschriebenen Richtung grundsätzlich entgegenstünden.

3. Ergebnisse in Bezug auf die Gestaltung von ressourcenleichten Infrastruktursystemen:
   - Eine Umgestaltung der Infrastruktursysteme in Richtung Ressourcenleichtigkeit ist vor dem Hintergrund der Komplexität der Systeme und der technischen, ökonomischen und mentalen Pfadabhängigkeiten eine große Herausforderung. Zugleich ist bei der Umgestaltung der Infrastruktursysteme kritisch zu prüfen, welche neuen Pfadabhängigkeiten eingeschlagen werden und welche Möglichkeitsfenster für die Zukunft mit heutigen Entscheidungen geöffnet bzw. geschlossen werden. Diese Entscheidungen abzuwägen und zu treffen, heißt zum einen, mit Ungewissheiten und Unsicherheiten umgehen zu müssen, zum anderen verdeutlicht es aber die Bedeutung von vereinbarten und möglichst von den relevante Akteuren geteilten Vorstellungen über die einzuschlagenden Pfade.
   - Bei der Entwicklung der vier Fallstudien wurde stets darauf geachtet, einerseits Ressourcenleichtigkeit anzustreben, andererseits jedoch die modellierten Veränderungen im Rahmen des technisch und gesellschaftlich Machbaren bzw. Akzeptierten anzulegen. Es wurde demnach nicht pauschal für alle Infrastruktursektoren von erheblichen gesellschaftlichen und soziotechnischen Veränderungen im Sinne einer radikalen Transformation der Systeme ausgegangen. Dies schlägt sich insbesondere in den Ergebnissen der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ nieder, in der die orientierende Stoffstromanalyse nur geringe Wirkungen im Hinblick auf Ressourcenleichtigkeit in Bau und Betrieb ausweist.
   - Im Rahmen des Vorhabens wurden auch keine radikalen Veränderungen des Bedarfs an Infrastrukturdienstleistungen (z. B. Suffizienz) modelliert, die sich in grundlegenden Transformationen der Infrastrukturen bzw. Bedarf an Infrastrukturausstattung niederschlagen würden. In der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ wurden technische und soziale Innovationen implementiert, die eine Verkehrsverlagerung- und Vermeidung und eine bessere Auslastung der Verkehrsinfrastrukturen ermöglichen. Die Verkehrsvermeidung im Personenverkehr ist jedoch nicht als radikale Veränderung des Bedarfes zu sehen, da die Mobilität weiterhin gewährleistet wird, es werden jedoch kürzere Wege zurückgelegt und Fahrzeuge besser ausgelastet. Aufgrund der geringeren Straßenverkehrsleistung kann in der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ ein geringerer Zubau an Infrastruktur abgebildet werden.
   - Die Frage nach den geeigneten Maßnahmen zur ressourcenleichten Gestaltung der Infrastrukturen und welche (langfristigen) Strategien verfolgt werden können und den Entscheidungen zugrunde liegen, ist nicht einfach. Schon die Diskussion und Verständigung im Rahmen der interdisziplinären Bearbeitung des Vorhabens haben gezeigt, wie unterschiedliche Sichtweisen und Bewertungen aufeinanderstoßen können. Die Gewichtung der Zieldimensionen und damit etwa die Priorisierung von Ressourcenleichtigkeit z. B. gegenüber Robustheit/Resilienz oder Akzeptanz im Hinblick auf eine konkrete Infrastrukturentscheidung können nicht abstrakt oder pauschal getroffen werden. Sie können in der Praxis nur im politischen und Stakeholder-Dialog erfolgen.
   - Auch die Diskussion und Einschätzung der Fallstudien anhand der qualitativen Kriterien zeigen, dass pauschale, verallgemeinerbare Aussagen nur bedingt möglich sind. Im Prinzip können die Kriterien nur im jeweiligen konkreten räumlichen, ökologischen und sozio-ökonomischen Kontext beurteilt werden.
   - Die Spielräume zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme durch eine einfache bauliche Umgestaltung der Infrastruktursysteme sind in den gewählten Fallkonstellationen begrenzt, wenn sich die Modellierung auf den Bau, die Instandhaltung und Reparatur von Infrastruktursystemen beschränkt und nicht am Betrieb, der Nutzung und an den Bedarfen bzw. der Nachfrage nach Infrastrukturdienstleistungen angesetzt wird. Der Energieaufwand bei dem Betrieb und der Nutzung der Infrastrukturen stellt einen großen Faktor dar, so dass die Betrachtung bzw. Suche nach ressourcenleichten Infrastrukturen neben den Aufwendungen für den Betrieb auch die Nutzung einbeziehen sollte.

- Für eine ressourcenleichte Gestaltung der Infrastruktur müssen verschiedene Maßnahmen („Bausteine“) miteinander kombiniert werden (wie Szenarette 2 verdeutlicht; vgl. Teil C), was integrierter und sektorenübergreifender Lösungsansätze bedarf. Die Szenaretten (3 und 4) zeigen, dass es weitere Optionen gibt, die eine über die Fallstudien hinausgehende Reduktion der Ressourceninanspruchnahme ermöglichen. Dies verdeutlicht, dass die modellierten Fallstudien keine für sich abgeschlossen Szenarien darstellen, sondern lediglich jeweils ein für sich abgeschlossenes Themenfeld adressieren. Die einzelnen umgesetzten Maßnahmen sind als „Bausteine“ zu verstehen, die kombiniert werden können. An diesem Beispiel wird deutlich, wie wichtig eine integrierte und sektorenübergreifende Betrachtung der Gestaltungsoptionen ressourcenleichter Infrastrukturen ist.

4. Methodische Hinweise und Erkenntnisse aus der Bearbeitung:
   - Ein zentraler Aspekt, der bei der Interpretation der Ergebnisse der Modellierung zu beachten ist, liegt in der im Vorhaben angelegten hohen Aggregation. Im Vorhaben RELIS wurde keine umfassende Ökobilanz, sondern eine orientierende Stoffstromanalyse durchgeführt. Aufgrund der Größe und Komplexität des Betrachtungsgegenstandes war eine detailliertere Bilanzierung nicht vorgesehen. Die Stoffstromanalyse soll einen Vergleich verschiedener Umgestaltungsvarianten/Konstellationen im Vergleich zum Referenzszenario ermöglichen. Die im Vorhaben erarbeitete orientierende Stoffstromanalyse bezieht sich auf den Infrastrukturbestand in Deutschland und nimmt keine räumliche und siedlungsstrukturelle Differenzierung vor. Welche konkrete Infrastrukturgestaltung an einem konkreten Ort sinnvoll und realisierbar ist, hängt von Rahmenbedingungen am jeweiligen Ort ab.
   - In den Szenarien/Fallstudien wurde mit einer Ausnahme (Strom für Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur) bis zum Jahr 2050 mit statischen Wirkungsfaktoren gerechnet. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der mit der Gewinnung der Rohstoffe verbundene Aufwand an Materialien, Energie- und Fläche in Zukunft verändert. Ursachen für solche Veränderungen können z. B. in der Änderung des Strommixes in den Förderländern, der Verschiebung hin zu anderen Förderländern oder zukünftiger Nutzung von Rohstofflagerstätten, die nur mit hohem Aufwand erschlossen werden können, liegen.
   - Bei der Darstellung der Gesamtergebnisse ist zu beachten, dass keine Trugschlüsse auf Basis der quantitativen Ressourcenparameter (insb. KRA) gezogen werden dürfen. Beispielsweise nimmt IKT zwar einen sehr geringen Anteil bei den Rohstoffen ein (KRA-Werte) und es liegt zudem eine schlechte Datenlage vor, aber es gibt im IKT-Sektor sehr hohe Wachstumsraten, viele kritische und seltene Rohstoffe (z. B. seltene Erden), die verwendet werden, und nicht absehbare technologische Entwicklungen mit möglicherweise hohem Rohstoffaufwand. Eine isolierte Sektorenbetrachtung insb. mit Blick auf die qualitativen Merkmale (Knappheiten, Kritikalität etc.) der im IKT-Sektor eingesetzten Rohstoffe bietet sich daher an, um die Relevanz der IKT-Infrastrukturen nicht zu unterschätzen.
   - Der Parameter KRA sagt nichts über die Knappheit oder Umweltrelevanz von Rohstoffen aus. Eine kritische Betrachtung gilt es daher insbesondere mit Blick auf den IKT- und Energie-Sektor (z. B. PV-Module, Windkraftanlagen, Batteriespeicher) und potenzielle Konflikte um (seltene) Rohstoffe zu führen. Zwar können mögliche Ressourcen- und Knappheitskonflikte im Vorhaben nicht betrachtet werden, da dies den Aufwand einer eigenen Studie nach sich ziehen würde, doch ist dies ein wesentlicher Punkt, der später weitere Maßnahmen beeinflussen kann. Bestimmte Rohstoffe aus dem KRA müssten näher betrachtet werden, um gegebenenfalls alternative Ausbauszenarien zu konstruieren bzw. ein Recycling kritischer Stoffe gezielt zu fördern.

## Empfehlungen

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen geben Hinweise auf wichtige Handlungsfelder, in denen geeignete Maßnahmen und adäquate Instrumente im Hinblick auf die zukunftsfähige und ressourcenleichte Gestaltung von technischen Infrastrukturen zu finden sind. Dazu wurden im Vorhaben RELIS Handlungsempfehlungen formuliert, die einerseits mögliche technische Veränderungen der Infrastruktursysteme thematisieren, andererseits aber auch die institutionellen, rechtlichen, organisatorischen und finanziellen Rahmenbedingungen betreffen. Die Empfehlungen und damit verbundenen Maßnahmen sind in insgesamt zehn „zentralen Handlungsfeldern" zusammengefasst. Dabei betreffen die Handlungsfelder und sehr häufig auch die einzelnen Empfehlungen mehrere der betrachteten Infrastruktursysteme. Darin zeigt sich der systemische Ansatz, der die Analyse als grundsätzliche Prämisse geprägt hat. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass isolierte Einzelmaßnahmen für sich genommen kaum zu beurteilen sind, sondern stets der Gesamtkontext aus einer strategischen Perspektive berücksichtigt werden muss.

Die strukturierende Ebene der Handlungsfelder lässt erkennen, dass zwischen einzelnen Empfehlungen (E) Zusammenhänge bestehen. Den Einstieg bilden Handlungsfelder, die einen übergeordneten Charakter haben und dabei wesentliche Voraussetzungen für die Umsetzung weiterer Empfehlungen betreffen. In der aufsteigenden Reihenfolge werden die Handlungsfelder dann zunehmend konkreter.

In Teil E sind die Empfehlungen detailliert hergeleitet und auch mit Beispielen aus der Best-Practice-Sammlung im Vorhaben unterlegt. Hier werden die Empfehlungen, wo möglich, auch stärker einzelnen Sektoren und Akteuren zugeordnet.

### Handlungsfeld: Bewusstsein schaffen, Ziele festlegen

- E1: Das Thema „Ressourcenleichte Infrastrukturen" muss den Entscheidungsträgern in Bund/Ländern und insbesondere Kommunen sowie darüber hinaus auch anderen relevanten Stakeholdern stärker bewusst gemacht werden.
- E2: Die Ziele und Merkmale (zukunftsfähig, ressourcenleicht, demografiefest, robust, umweltschonend) der Infrastrukturgestaltung/-entwicklung müssen in ihren jeweiligen räumlichen und institutionellen Kontexten politisch verhandelt und demokratisch legitimiert werden.
- E3: Die Auseinandersetzung mit Fragen der zukünftigen Gestaltung der Infrastrukturen sollte sektorenübergreifend und zugleich kontextspezifisch erfolgen.
- E4: Die ressourcenleichte Gestaltung/Umgestaltung von Infrastrukturen sollte stets im Zusammenhang mit anderen umweltbezogenen Zielen begriffen werden. Unter Umständen muss eine vorübergehend erhöhte Ressourceninanspruchnahme für eine langfristig robuste und umweltschonende Infrastruktur in Kauf genommen werden.

### Handlungsfeld: Unterschiedliche räumliche Kontexte beachten

- E5: Unterschiedliche räumliche Kontexte spielen schon bei der Diskussion über Zieldefinitionen eine wichtige Rolle und sind auch aus diesem Grund bei der Anpassung, Weiterentwicklung bzw. dem Umbau von Infrastrukturen zu berücksichtigen. In jedem Fall ist das Zusammenspiel der unterschiedlichen (räumlichen und institutionellen) Ebenen zu gewährleisten.
- E6: Die Bewertung konkreter Gestaltungsoptionen sollte entsprechend des Subsidiaritätsprinzips auf lokaler bzw. regionaler Ebene erfolgen, weil dann regionale Besonderheiten und Rahmenbedingungen berücksichtigt werden können und sich die zu erwartenden Effekte greifbarer kommunizieren lassen. Dies gilt für räumlich begrenzte Infrastrukturen ebenso wie für übergeordnete (nationale) Planungen, die sich in konkreten Räumen niederschlagen.

**Handlungsfeld: gebauter Infrastrukturbestand – Perspektivwechsel zur Nutzung der bestehenden Infrastrukturen einnehmen**

- E7: Bei der Prüfung der Umsetzung neuer Infrastrukturprojekte muss die zukünftig induzierte Ressourceninanspruchnahme im gesamten Lebenszyklus (also etwa für Betrieb, Instandhaltung und auch Ersatzneubauten) bei der Bewertung von alternativen Realisierungsoptionen mit berücksichtigt werden.
- E8: Eine ressourcenleichte Infrastrukturgestaltung darf nicht auf die gebaute Infrastruktur beschränkt bleiben, sondern muss auch die (ggf. veränderte) Nutzung als Betrachtungsperspektive einbeziehen.

**Handlungsfeld: Ressourcenleichtes Verhalten durch Infrastrukturen ermöglichen**

- E9: Bei der Bewertung von technischen Optionen zur Umgestaltung von Infrastrukturen sollten erforderliche und möglich werdende Verhaltensänderungen in den Blick genommen werden.
- E10: Um durch Infrastruktur ressourcenleichte Verhaltensweisen nicht nur zu ermöglichen, sondern tatsächlich zu fördern, sollten Steuerungs- und Lenkungsinstrumente eingesetzt und Anreize für die Nutzenden geschaffen werden (zusätzliche positive Effekte die größer sind als ggf. vorhandene negative Auswirkungen).
- E11: Wird durch die Infrastrukturgestaltung ein verändertes Verhalten möglich, müssen auch mögliche Rebound-Effekte[4] erkannt und berücksichtigt werden.

**Handlungsfeld: Dilemma aus Flexibilität und Sicherheit akzeptieren: Planung, Umsetzung und Technik**

- E12: Das Dilemma aus erforderlicher Planungssicherheit für Investitionsentscheidungen und deren Umsetzung einerseits und andererseits möglichst weitgehender Flexibilität in Bezug auf sich verändernde Entscheidungsgrundlagen sollte akzeptieren und in geeignete Instrumente im Rahmen von Planungs- und Umsetzungsprozessen von Infrastrukturmaßnahmen im Sinne einer flexiblen, sich anpassenden Entwicklungsplanung übersetzt werden.
- E13: Planungsprozesse sollten zukünftig auch Abbruchkriterien bzw. Indikatoren für notwendige Pfadänderungen definieren, mit denen auf besonders drastische Veränderungen der Rahmenbedingungen und Anforderungen reagiert werden kann.
- E14: Richtlinien, Normen und Standards sollten systematisch in Hinblick auf deren Wirkung auf Ressourcenverbrauch überprüft werden. Der Bund könnte durch Förderung der Forschung in diesem Bereich zur Erstellung von Empfehlungen und Anpassung der Regelwerke an den Stand der Technik hinwirken.

**Handlungsfeld: Noch stärker als bisher auf integrierte Lösungen setzen**

- E15: Auf den verschiedenen räumlichen Ebenen und sektorbezogenen Fachplanungen sollte noch stärker als bisher nach Verfahren und Strukturen gesucht werden, wie integrierte Ansätze in Planungsverfahren und bei Entwicklungsprozessen gefördert werden können. Nicht zuletzt die Erfahrungen aus kommunalen Energieleitplänen oder dem Stadtumbau Ost zeigen, dass sich durch eine frühzeitige Abstimmung von Entwicklungsprozessen zwischen städtischen Akteuren optimierte Infrastrukturlösungen schaffen lassen.
- E16: Bei der Suche nach „integrierten Lösungen“ sollte neben einer Auseinandersetzung mit den technischen Erfordernissen auch eine intensive Befassung mit den erforderlichen Gover-

4 Eine bezogen auf eine Nutzungseinheit ressourcenleichtere Nutzung kann zu einer Ausweitung der Nachfrage und damit im Ergebnis zu mehr Ressourceninanspruchnahme führen.

nance-Strukturen, d. h. dem Zusammenspiel der relevanten Akteure bei Planung und Betrieb der Infrastrukturen, erfolgen.

- E17: Integrierte Ansätze in Planungsverfahren leben von der Vielfalt der Sichtweisen, Kenntnisse und Interessen der Akteure. Diese gilt es wertzuschätzen (auch wenn es manchmal „schwierig ist"). Hier sind Beteiligungs- und Mediationsverfahren wichtige Werkzeuge.

**Handlungsfeld: Rohstoffe – Kreislaufwirtschaft fördern – Umweltfolgen verringern**

- E18: Recycling von Baustoffen und Materialen in Infrastruktursystemen bringt erhebliche Effekte für Ressourcenleichtigkeit und sollte daher in allen Sektoren und Infrastrukturkomponenten konsequent ausgebaut werden.
- E19: Eine Erhöhung der Recyclingquote für Baustoffe und Materialen von Infrastruktursystemen könnte etwa durch finanzielle Anreize für deren Verwendung, die Ausweisung als Kriterium in den „Terms of Reference" öffentlicher Ausschreibungen, im Aufbau von (regionalen) Sekundärrohstoff-Märkten oder von Normierungen zur Sicherung von Qualitäten unterstützt werden.

**Handlungsfeld: Energiewende beschleunigen und Kohleausstieg forcieren**

- E20: Nach dem Ausstieg aus der Kernenergie sollte nun auch der Ausstieg aus der Kohle konsequent und möglichst zügig angegangen werden.
- E21: In der Abwägung der mit einem forcierten Ausbau von EE-Anlagen notwendigen Flexibilitätsoptionen (Stromnetzausbau, Einspeise- und Lastmanagement, Smart Grids, verschiedene Speicher) sollte neben den gängigen Kriterien wie Systemstabilität, Sicherheit, Kosten etc. auch die Ressourceninanspruchnahme (Rohstoffe, Energie, THG, Fläche) durch Bau, Betrieb und Unterhalt der Infrastruktursysteme berücksichtigt werden.
- E22: Neue Anlagen sollten da errichtet werden, wo dies mit Perspektive auf die Übertragungsnetze sinnvoll ist. Bei der Auswahl von Standorten sollten zudem Kriterien wie Zersiedlung und Landschaftsbeeinträchtigung berücksichtigt werden.

**Handlungsfeld: Bei der Infrastrukturplanung die Flächenpotenziale berücksichtigen**

- E23: Der durch den Neubau von Infrastrukturen verursachte Flächenverbrauch sollte möglichst reduziert werden.
- E24: Es sollte eine obligatorische Prüfung der Flächeninanspruchnahme für Infrastruktursysteme in der Bauleitplanung und Fachplanungsgesetzen verankert werden.

**Handlungsfeld: Informations- und Kommunikationstechnologien als Schlüsseltechnologie begreifen**

- E25: Der Breitbandausbau sollte weiter vorangetrieben werden. Bei der Vergabe von Investitionskostenzuschüssen, beispielsweise aus Landes- und Bundesförderprogrammen, sollten jene Technologien bevorzugt werden, die ressourcenleicht und zukunftssicher sind.
- E26: Es sollten Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Rechenzentren definiert werden, vergleichbar mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) bei Gebäuden. Dies könnte beispielsweise auf europäischer Ebene erfolgen (Ökodesign-Richtlinie) oder im Zusammenhang mit nationalen Förderprogrammen.
- E27: Bei zunehmender Abhängigkeit von Datenübertragung muss ein besonderes Augenmerk auf den Datenschutz und die Datensicherheit gerichtet werden. Zur Erreichung der Akzeptanz von neuen vernetzten Technologien muss die Zivilgesellschaft an der Entwicklung von zuverlässigen Datenübertragungsstandards beteiligt werden.
- E28: Damit der Wettbewerb unter IKT-Anbietern aufrecht erhalten bleibt und keine parallelen IKT-Infrastrukturen aufgebaut werden müssen, ist die Interoperabilität von Datenübertra-

gungsstandards und Software maßgeblich. Hier sind Standardisierungsinstitutionen gefordert, offene Standards zu entwickeln, die von der Industrie ohne proprietäre Einschränkungen angewendet werden können (z. B. für Smart-Home, Smart-Metering, sektorenübergreifende Vernetzung).

- E29: Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Bewertung der Ressourceninanspruchnahme durch IKT müssen verbessert werden. Hierzu sollten entsprechende Forschungsaktivitäten intensiviert werden.

## Summary

Technical infrastructure systems for the supply of energy and water and disposal of wastewater and for mobility and information and communications technologies (ICT) are fundamental to life in modern societies. Enormous flows of material as well as information and goods "move" through these infrastructures. They open up spaces, capture and convert environmental resources (*e.g.* water and gas) and transport them to where there is social need, making them available and usable. Infrastructure systems are not only relevant as instruments for transforming and utilising natural resources but, in their construction and operation, also make considerable demands themselves on a wide range of environmental resources. Establishing, operating and maintaining technical infrastructures is resource intensive. Large quantities of different materials are used every year to develop, renovate and maintain them and only a fraction of the necessary materials come from recycling of the technical infrastructures themselves. Over time a large amount of what is known as the anthropogenic stock of infrastructures has built up and is still growing. In the second half of the 2000s[5] the material stock in traffic, water/waste water and energy infrastructures was estimated to be 832.2 million t concrete, 91.8 million t steel/iron, 4.2 million t copper and 2.2 million t aluminium. An extra 9.8 million t concrete, 1.4 million t steel/iron, 48,000 t copper and 44,000 t aluminium are being added to these three infrastructure areas every year (Steger *et al.*, 2011). Combined with the decades-long lives of some of these technical infrastructures, these amounts will continue to accumulate. As some raw materials are rare and becoming increasingly scarce and expensive, it is necessary to use them sparingly, including in the areas infrastructures, not just for environmental reasons, but for economic ones as well.

Technical infrastructures and their maintenance are also a major cost factor for the public sector and/or users.

As the construction, operation, maintenance and repair of technical infrastructures represent a considerable proportion of material input in society, resource-light, future-proof design can make a considerable contribution to the implementation of resource efficiency and sustainability policies.

They are therefore of particular interest in terms of the environment, climate and sustainability. The "Resource-light, future-proof infrastructures – environmentally friendly, robust and demographically sound" (RELIS) project dovetails with the framework of objectives contained within the German government's National Sustainability Strategy (2002), Resource Efficiency Programme (ProgRress 2012), Energy Concept (2010) and Climate Action Programme (2014) and the Paris Agreement ratified by the German government on 5 October 2016. Against this backdrop and the various so-called "megatrends" of the past few years is the question of the forms and design of future-proof infrastructures. Demographic and climate change have as much of an impact as social and technological change and innovation. Decarbonisation and the fundamental conversion of the energy supply as part of Germany's "energy transition" are key objectives that throw up questions about the future design and function of technical infrastructures. Based on the classic public service principles of universality, affordability and accessibility, a whole host of other requirements are also incorporated. They include resilience (the ability to avert a breakdown or outage of technical infrastructures when disruptions occur – for example as a result of external influences, overloads or defects – and promptly restore them to an acceptable condition), flexibility, conservation of resources and resource efficiency. In comparison, "resource lightness" is a relatively new term for which there is as yet no agreed definition.

5 An exact year cannot be given as the base years in the sources for stock levels in the individual sectors differ from one another in some areas. The sources relate to the years 2005 to 2009.

Resource lightness in the context of the RELIS project is the minimisation of resource consumption during the whole lifecycle of an infrastructure, *i.e.* its construction, operation, upkeep (building and maintenance), demolition and removal. Materials, energy and space are considered as resources.

Infrastructure systems are a prerequisite for the economy and society and consequently affect them, but they are planned, implemented and funded as a result of economic and social decisions. In this respect infrastructures are complex socioeconomic and socio-technological systems with technical, economic and institutional subsystems that are hard to differentiate between. They are shaped significantly by their environmental conditions.

Within the scope of this project, the various different facets and dimensions of infrastructures were taken into consideration as comprehensively as possible. Technical infrastructures were therefore considered systematically across and between sectors in order to be able to exploit possible synergies between the different infrastructures and with other policy areas. The overarching **objective** of the RELIS research project was to develop recommendations for a resource-light, future-proof design of technological infrastructures for energy, traffic, water/waste water and information and communications technologies. Essential developments and future trends such as demographic and climate change, volatile and rising prices of raw materials, technological change, economic structural change and social change were taken into account. However, the resource-light design of these infrastructures should have a minimal impact on their functionality or robustness when confronted with negative external influences and malfunctions as a result of temporary overload or underload, and be economically stable in the long term. This multi-dimensional target system of infrastructure design provided the backdrop to this project.

The **subject matter** of the study was the following "basic technical infrastructures" (BMI 2009, p5) of public services in Germany:

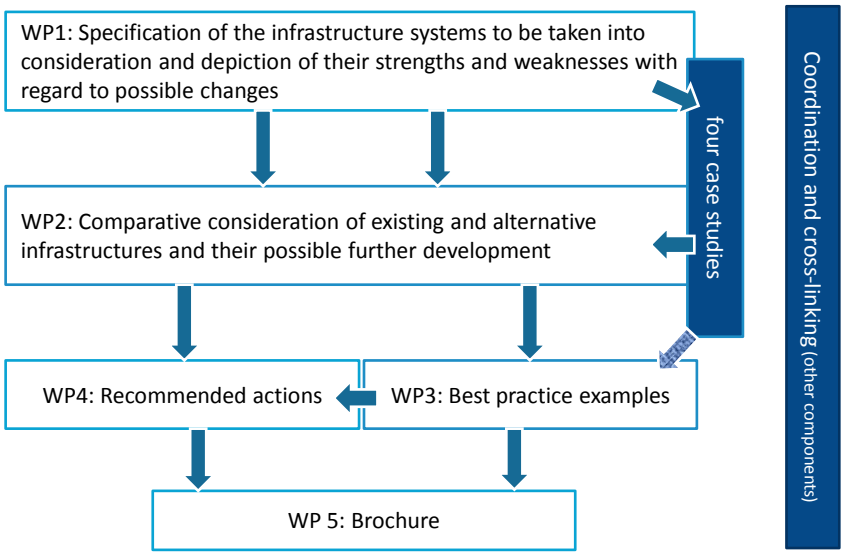
- traffic infrastructures: roads, rail, inland waterways, air
- energy supply: electricity, heat, gas
- domestic water management: water supply and waste water disposal
- information and communications technologies (ICT).

The infrastructure systems are were not considered individually due to their many and diverse interrelations and dependencies. New or intensified links between sectors and infrastructures are currently being discussed under "sector coupling" during the energy transition debate. With a view to the project objectives formulated at the outset, one of the tasks was to classify and systemise the different and varied aspects and factors involved in adapting, developing and converting infrastructures in order to obtain an overall cross-sectoral picture and develop recommendations for the future design of infrastructures.

### Approach and methods

The RELIS project combined quantitative and qualitative methods and approaches. Fundamentally the project was based on a comparison of different scenarios in 2050. Scenarios of resource-light infrastructures ("case studies") were compared with a reference scenario ("current measures") and evaluated against the results of a preliminary material flow analysis and cost estimations as well as qualitative analyses. For this purpose, in a first step a comprehensive review of the infrastructures was undertaken and a SWOT analysis (strengths, weaknesses, opportunities, threats) of the infrastructures and their subsystems performed. The results were underpinned by a compilation of examples of best practice in the study area. In the overall assessment of the results, recommendations have been made for the design of resource-light, future-proof infrastructures, including the actions and tools required to implement them.

Figure 1: An overview of the work package




Source: Difu/Öko-Institut.

The quantitative evaluation of the scenarios was undertaken using a preliminary material flow analysis, allowing statements on the use of raw materials, energy and space. The preliminary material flow analysis of infrastructures referred to their entire life cycle and therefore comprised the quantitative analysis for their construction and maintenance (upkeep, repair), operation and demolition. The use of particularly relevant infrastructures was excluded by system boundaries, but nonetheless information about this is given in boxes for key areas.

The following impact categories were taken into consideration in the preliminary material flow analysis:

- **cumulative raw material demand (CRD)** as the sum of all raw materials entering a system expressed in units of weight (kg/tonne)
- **cumulative energy demand (CED)** as a measure of the total demand for energy resources (primary energies) in connection with the manufacture, use and disposal of a product or service (*e.g.* in MJ/tonne)
- harmful substances that contribute to the warming of the earth's atmosphere were recorded, taking into account their global warming potential, which identifies the global warming potential of individual substances relative to carbon dioxide. This is indicated by **total global warming potential in $CO_2$-equivalents (GHG)** (in kg $CO_2$-eq./tonne)
- the inputs in the stocktake allowed the **use of space** by infrastructure subsystems to be portrayed.

An Excel tool was developed to perform the material flow analyses.

The methodology in the preliminary material flow analysis, the cost estimations and the qualitative approaches for the design and estimation of case studies are detailed in Part A of the report.

Five qualitative criteria were used for more in-depth investigations of the case studies: social acceptance, citizen participation, flexibility, reversibility and resilience. The system characteristics de-

termined by Germany's environment agency are portrayed in these five criteria because infrastructures by 2050 should not only be "resource-light" and "future-proof", but "environmentally friendly", "demographically sound" and "robust" as well (*cf.* project title). In-depth investigations ensured that the recommended actions coming out of the analyses of the case studies were not only systematically based on the quantitative results of the material flow analysis, but justified on the basis of the definition of infrastructures as socio-technical systems.

### Underlying conditions and trends

Infrastructures as socio-technical systems are subject to a series of changing underlying conditions and future trends that have to be taken into consideration in an analysis of possible transformations. Significant **change processes** ("megatrends") for technical infrastructures include (*cf.* among others Libbe/Köhler/Beckmann 2010):

- demographic change
- a shortage of fossil fuels, decreasing availability of resources and ensuing price increases
- climate change and actions on climate protection
- change in accommodation structures and increasing disparities in space
- social change (among others individualisation and differentiation in social structure, lifestyles)
- financial scope for action by the public sector, particularly communes
- technological change, more rapid innovation and product cycles, digitisation.

Anticipated or already heralded trends that can be identified across different infrastructure sectors include:

- new or increasing couplings of different infrastructure areas/sectors ("sector coupling"): waste water-energy, ICT-energy, energy-traffic
- sensitivity to and emphasis on the criticality, vulnerability and resilience of (critical) infrastructures (BMI, 2009)
- sensitivity to dealing with uncertainties when planning durable technical infrastructures
- changed requirements or principles relating to the design of infrastructure systems, such as resource efficiency, flexibility, adaptability and resilience (*cf.* Kluge/Libbe 2006, Libbe/Petschow 2015).

Against this backdrop, it is possible to identify sector-specific options and strategic approaches that can contribute to the resource-light design of infrastructures. The options can be technical in nature, but can also relate to changed institutional arrangements (among others governance and economic mechanisms). It is important to note that most options (except pure sufficiency strategies) do not lead to an equal reduction in the use of all the resources considered, so that (ultimately only in context-specific terms) political and technical decisions need to be made on the selection of options[6].

### Scenarios

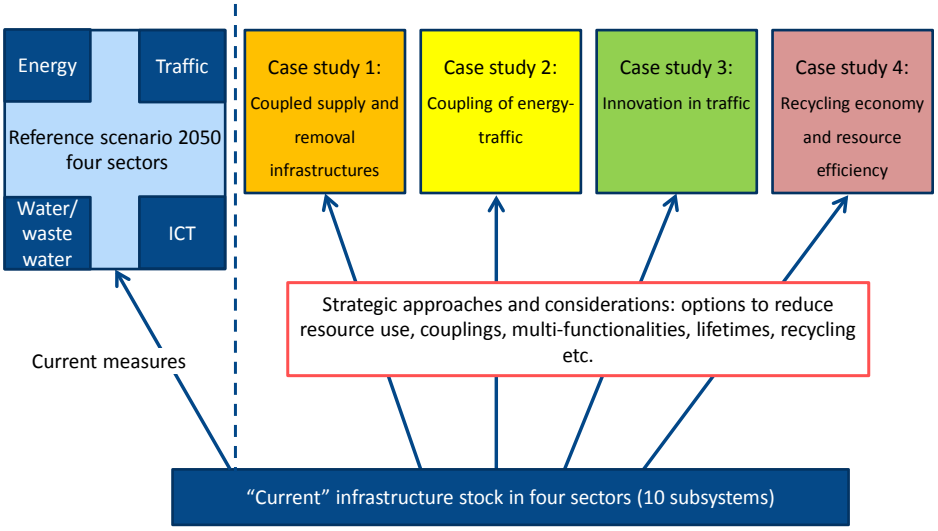
The RELIS project compared four alternative scenarios ("case studies of resource-light infrastructures") with a reference scenario. All five scenarios assumed the same infrastructure stock in the four sectors in 2012. The present-day infrastructure stock was then developed further in the individual scenarios under different assumptions and with the measures described in the scenarios in the years 2030 and 2050. "Current measures" were identified and reproduced in the reference scenario. In the

6 For example decentralised options for power generation might avoid the need for network expansion, but could lead to extra demand for resources in other areas, such as when additional power stations or storage have to be established in certain regions.

alternative scenarios, different approaches and options for reducing resource use were modelled in the case studies.

The development and relationship between the scenarios can be illustrated in the following basic structure:

Figure 2: Basic structure and relationship of the scenarios in the project




Source: Difu/Öko-Institut.

**An overview of the methodology**

The reference scenario is a "current measures scenario", which means:

- it is not a "business-as-usual" scenario
- the reference scenario in technological terms is geared towards moderate modernisation/optimisation paths
- the reference scenario is built on common metaparameters, *i.e.* valid for all infrastructures (demography, economic development *etc*.)
- Basis: "Climate Protection Scenario 2050" study by the Öko-Institut and Fraunhofer ISI, which uses scenarios with different climate policy ambitions for 2050 ("Current measures 2012", KS 80, KS 90) (*cf.* Repenning *et al* 2015).
- The core of the underlying climate protection scenario study is the German government's energy concept.
- Distinctions in the reference scenarios are in the sector-specific assumptions.

The "resource-light infrastructure" case studies are used as alternative scenarios to the reference scenario. They differ in that they have the following characteristics:
the metaparameters adopted in the alternative scenarios (demography, economic development *etc*.) correspond to those in the reference scenarios

- they integrate different infrastructures and sectors
- they are more than the implementation of individual technical options for optimisation
- the measurement sets and strategy packages underlying the alternative scenarios are constructed in such a way that they allowed resource lightness to be presumed

The focus of the target system in these scenarios is on the project's normative approach.

The assumptions made within the scope of the scenarios are explained in detail in Part C of the report and expressed in the Annex in differentiated trends in stock levels. Behind assumptions about the development of the infrastructures, assumptions were also made about the future development in the requirements for infrastructure services.

The reference scenario was based on the "Climate Protection Study 2050" ("Current measures scenario 2012") (Repenning *et al.* 2015). The "resource-light infrastructure" case studies were based on:

- the infrastructure stock in Germany in 2012
- sector-specific investigations
- a SWOT analysis (strengths/weaknesses/opportunities/threats)
- plausible-seeming strategic approaches to influencing resource use through infrastructures
- assumptions supported by the literature on the development in trends and change processes in infrastructure sectors.

The case studies depicted the possible designs ("scenarios") of future infrastructures in 2050 and were deliberately intended to be "resource light". It was not a matter of depicting probable developments as extensively as possible since the functionality of the infrastructures and the principles that apply for public services today were not challenged by the case studies.

Over and above this the impact of power generated by fossil fuel-fired plants depicted as "use" was also portrayed.

The following four case studies were ultimately designed for the development of "resource-light, future-proof infrastructures" (Part C, chapter 5):

1. coupled supply and removal infrastructures
2. coupling of energy-traffic
3. innovations in transport
4. recycling economy, resource efficiency.

In order to develop sound recommendations for the design and further development of resource-light infrastructures, it was appropriate to conduct in-depth investigations (Part C, chapter 6) by means of a preliminary material flow analysis and cost estimation (Part C, chapter 5). Correspondingly **barriers** to the further development of infrastructures or even a fundamental system change were to be followed up. As infrastructures have long periods of use and amortisation and there are consequently technical-economic path dependencies, it was important to identify cost-effective **timeframes** for the adaptation or further development of a system. Over and beyond these issues, **sensitivity analyses** for central assumptions and components in the interactions between case studies were elaborated and **sub-scenarios** modelled for combinations of case studies[7] or other customised adaptations. This means that assumptions could be tested and key elements identified for the design and further development of resource-light infrastructures.

#### Conclusions of the scenario analyses

The following results of the RELIS project are ordered in relation to (1) resource use, (2) cost estimations, (3) the design of resource-light infrastructures and (4) the methodological information and findings of the study.

1. Results relating to resource use:
   - The current stock of technical infrastructure in Germany is huge, including extensive anthropogenic storage with a considerable associated "consumption of materials, energy and space". The current high level of stock will also lead to high resource use in future. In many infrastructure areas (*e.g.* the road network or the information and communications technology infrastructure), further development of the networks will increase this resource use in future even more.
   - The results of the preliminary material flow analysis also show that there is a set of measures that can reduce the infrastructures' resource use (CRD, CED, GHG and space). It is important to bear in mind the infrastructure's entire life cycle (construction and maintenance, building input and operation, demolition/removal). The implemented measures in infrastructure construction and maintenance in part lead to higher resource usage (*cf.* the "Coupled supply and removal infrastructures" case study), but also allow a reduction of resource consumption in its operation. In other cases, savings can actually be made in terms of global warming emissions while other observed impact categories increase resource consumption, resulting in conflicts between objectives in the (re-)design of infrastructures.
   - In relation to the construction and maintenance of infrastructure systems, it is evident that at first glance, and looking at the overall results on a highly aggregated level, the changes in resource parameters for recording resource use are low compared with the different scenarios in the chosen constellations of case studies. Looking more closely at the details in the individual sectors and subsystems, however, it is evident that there are interesting differences between the scenarios. The traffic sector has the highest proportion of all the impact categories ob-

[7] For example the two case studies on traffic shift and avoidance and increased electrification were merged.

served, but road traffic infrastructures have the greatest influence. Resource use by energy infrastructures is closely linked to energy needs. Owing to their comparatively long useful life (particularly in networks), domestic water management infrastructures are (financially) comparatively resource-light and relatively stable in their design. ICT infrastructures represent very low proportions in the parameters.

- Resource use determined by infrastructure development does not necessarily need to be assessed as negative. Infrastructures can also provide the basis for the resource-light use of infrastructures (*e.g.* the development of the rail sector allows more energy-efficient traffic) or resource-light behaviour (*e.g.* the development of the ICT infrastructure allows multimodal mobility). There is much greater potential for resource lightness in terms of use than there would be from the (additional) resource use of the infrastructure itself. Consequently, as shown in particular by the "traffic-energy" and "innovations in transport" case studies as well as by subscenario 2, infrastructures can serve as "enablers" of resource-light operation and use.
- Owing to the high proportion of total resource use by the road traffic infrastructure, any measures implemented have a considerable impact. This is illustrated by the results of the "Recycling economy and resource efficiency" case study. The measures for the recycling economy (recycling) involving infrastructure construction materials (particularly asphalt) applied in this case study show considerable potential for greater resource lightness, particularly with regard to cumulative energy demand. The greater use of secondary materials (*e.g.* asphalt and copper) and the increase in their useful life can therefore help reduce annual resource input. This aspect is particularly relevant because potentials not only have an effect on all the infrastructure stocks being transformed (*e.g.* network extensions), but almost all stock is addressed through maintenance and renewal.
- The transformation of the energy supply infrastructure is particularly important and is already included to a limited extent in the reference scenario. In terms of the operation of the energy supply infrastructure, it leads to reduced resource use through the decreasing stock of lignite and coal-fired power stations. In this case, their operation reflects the energy source materials associated with the level of their own consumption. The trajectory of renewable energy generation plants is making its way into the other infrastructures, with the power used in their construction and operation becoming more resource light. Ultimately the more rapid reduction in fossil fuel power plants in the case studies leads to a cumulative emission reduction of 40 to 90 million tonnes of $CO_2$ equivalents.

2. Results relating to cost estimations:
   - Cost estimations for the individual scenarios reveal that no cost trends are to be expected in any of the modelled case studies compared with the reference scenario. In principle this would prevent further developments in the direction described.

3. Results relating to the design of resource-light infrastructures:
   - Against the backdrop of complex systems and technical, economic and mental path dependencies, the transformation of infrastructure systems towards resource lightness is a huge challenge. At the same time, it is essential in their transformation to critically examine which new path dependencies are being created and what future windows of opportunity are being opened or closed by the decisions taken today. Weighing up and making these decisions means having to deal with uncertainties and doubts, but also illustrates the importance of having ideas about the paths to be taken that are shared by the relevant actors as much as possible and agreed between them.
   - When developing the four case studies, attention was continually paid to striving for resource lightness while applying the modelled changes in the context of what would be technically and

socially feasible or acceptable. Considerable social and socio-technical changes in terms of a radical transformation of systems were therefore not assumed for all infrastructures across the board. This is reflected in particular in the results of the "Coupled supply and removal infrastructures" case study in which the preliminary material flow analysis reveals only low impacts with regard to resource lightness in construction and operation.

- Within the scope of this project, no radical changes to the need for infrastructure services (*e.g.* sufficiency) were modelled that would be reflected in a fundamental transformation of infrastructures or a need for infrastructure provision. In the "Innovations in traffic" case study, technical and social innovations were implemented that allow a shift in and avoidance of traffic and better utilisation of the traffic infrastructures. However, traffic avoidance in passenger transport is not to be considered a radical change in need since mobility will continue to be guaranteed. Instead shorter journeys will be made and the vehicles better used. The reduced road traffic performance in the "Innovations in transport" case study suggest a smaller addition of infrastructure.
- The question of suitable measures for the resource-light design of infrastructures and the (long-term) strategies that can be pursued and form the basis for decision-making is not an easy one. Already the discussion and agreement in the context of the project's interdisciplinary work have shown how different perspectives and evaluations can clash. The weighting of target dimensions and consequently the prioritisation of resource lightness, *e.g.* towards robustness/resilience or acceptance in terms of a specific decision about infrastructure, cannot be made sweepingly or in the abstract. In practice it can only take place in political and stakeholder dialogue.
- The discussion and assessment of the case studies using qualitative criteria show that sweeping, generalised statements can only made to a certain extent. In principle the criteria can only be judged in their specific spatial, environmental and socio-economic context.
- The scope to reduce resource use through a simple structural transformation of infrastructures is limited in the chosen case constellations if the modelling is confined to the construction, maintenance and repair of infrastructures and not assessed in terms of their operation, use and needs or the demand for infrastructure services. The energy input in the operation and use of infrastructures is a crucial factor and therefore, alongside the inputs in their operation, any consideration about or search for resource-light infrastructures should also include their use.
- Different measures ("modules") have to be combined (as illustrated in sub-scenario 2; cf. Part C) for the resource-light design of infrastructures and this requires integrated, cross-sectoral solutions. The sub-scenarios (3 and 4) show that there are other options that allow a reduction in resource use over and above the case studies. This illustrates that the modelled case studies are not self-contained scenarios but only address a self-contained topic. The individual measures implemented are to be seen as "modules" that can be combined. In this example the importance of integrated, cross-sectoral thinking about design options for resource-light infrastructures is evident.

4. Methodological information and findings:
   - A central aspect to be considered when interpreting the modelling results is the high aggregation involved in the RELIS project. A comprehensive eco-calculation was not performed, but there was a preliminary material flow analysis. Due to the size and complexity of the subject matter there was no provision for a detailed calculation. Material flow analysis should allow a comparison of different re-design variations/constellations in comparison with the reference scenario. The preliminary material flow analysis undertaken in the project refers to infrastructure stock in Germany, with no differentiation in terms of spatial settlement structures. The

type of specific infrastructure design that is sensible and realisable in a specific location depends on the underlying conditions in that location.

- In the scenarios/case studies, statistical impact factors were calculated for 2050 with one exception (electricity involved in building materials and infrastructure operation). However, it can be assumed that input in terms of materials, energy and space associated with the extraction of raw materials will be different in future, for example as a result of a change in the electricity mix in the producer countries, a shift towards other producer countries or use of raw material deposits in future that can only be extracted at great expense.
- When presenting the overall results, care should be taken not to draw false conclusions on the basis of quantitative resource parameters (in particular CRD). For example ICT uses a very small proportion of raw materials (CRD value) and the data is poor. However, in the ICT sector very high rates of growth are experienced, several critical and rare raw materials (*e.g.* rare earths) are used and it is hard to anticipate technological developments that might require the high input of raw materials. A view of individual sectors is therefore offered, particularly with a view to qualitative characteristics (scarcity, criticality *etc.*) of the raw materials used in the ICT sector so as not to underestimate their relevance in ICT infrastructures.
- The CRD parameter reflects none of the scarcity or environmental relevance of the raw materials. Critical consideration should therefore be given to the ICT and energy sector (*e.g.* PV modules, wind turbines, battery storage) and to possible conflicts over (rare) raw materials. Any disputes over resources and shortages could not be considered in this project as it would necessitate a study of its own, yet this is a key point that can subsequently influence other measures. Certain raw materials from the CRD would need to be looked at more closely in order to devise alternative expansion scenarios where applicable or target the recycling of critical materials.

**Recommendations**

The results and conclusions indicate important action areas and include suitable measures and appropriate instruments with regard to the resource-light design of future-proof technical infrastructures. The RELIS project has formulated recommendations that address possible technical changes to infrastructure systems but also concern their underlying institutional, legal, organisational and financial conditions. The recommendations and associated actions are summarised in a total of ten key action areas. The action areas and very often also the individual recommendations concern several of the infrastructure systems considered in this study. This reflects the systematic approach characterising the analysis. At the same time, however, it is also evident that it is practically impossible to evaluate individual actions in isolation. Instead the overall context must always be taken into account from a strategic perspective.

The key action areas show that there are connections between individual recommendations (R). They start with overarching actions and involve the essential prerequisites for the implementation of the remaining recommendations. The actions become more specific as they go along.

The recommendations are detailed in Part E and highlighted with examples of best practice. Wherever possible, the recommendations are assigned more to individual sectors and actors.

**Action area: Awareness raising and establishment of objectives**

- R1: There must be greater awareness of the subject of “resource-light infrastructures” among decision makers in the country/states and particularly in communes, and among other relevant stakeholders too.

- R2: The objectives and characteristics (future-proof, resource-light, demographically sound, robust, environmentally friendly) of infrastructure design/development must be politically negotiated with democratic legitimacy in their respective spatial and institutional settings.
- R3: Issues about the future design of infrastructures should be examined in a cross-sectoral and simultaneously context-specific way.
- R4: The resource-light design/redesign of infrastructures should always be undertaken in conjunction with other environmental objectives. In some circumstances a temporary increase in resource use has to be accepted in return for a robust and environmentally friendly infrastructure in the long run.
- Action area: Consideration of different spatial contexts
- R5: Different spatial contexts already play an important role when discussing definitions of objectives and should therefore also be taken into account when adapting, developing or converting infrastructures. The interplay of the different (spatial and institutional) levels should always be guaranteed.
- R6: The evaluation of specific design options should be undertaken at a local or regional level in accordance with the principle of subsidiarity because regional peculiarities and underlying conditions can then be taken into account and anticipated impacts communicated more clearly. This applies to regional infrastructures as much as it does to overarching (national) planning that is reflected in specific spaces.

**Action area: Built infrastructure stock – capturing a shift in perspective on the use of existing infrastructures**

- R7: When reviewing the implementation of new infrastructure projects, future resource use throughout their life cycle (thus for their operation, maintenance and also replacement) must be taken into account when evaluating alternative options for their realisation.
- R8: Resource-light infrastructure design should not just be confined to the built infrastructure, but should also consider the prospect of any change in use.

**Action area: Enabling resource-light behaviour through infrastructures**

- R9: When evaluating technical options for the transformation of infrastructures, consideration should be given to possible and necessary changes in behaviour.
- R10: In order not only to enable resource-light types of behaviour through infrastructure but to actually promote it, management and guidance tools should be used and incentives created for users (additional positive effects that are greater than any existing negative impacts).
- R11: If infrastructure design makes a change in behaviour possible, potential rebound effects[8] must also be identified and considered.

**Action area: Acceptance of conflicts between flexibility and certainty: planning, implementation and technology**

- R12: The conflict between the planning security required for investment decisions and having as much flexibility as possible to change bases for decision-making should be accepted. It should then be translated into suitable instruments for planning and implementation processes around infrastructure measures for flexible and evolving development planning.

8 Resource-light use of a unit can lead to an increase in demand and therefore ultimately to greater resource use.

- R13: In future, planning processes should also define stop criteria or indicators for necessary path adjustments to respond to particularly drastic changes in underlying conditions and demands.
- R14: Guidelines, norms and standards should be systematically reviewed for their impact on resource consumption. By promoting research in this area, the German government could work on developing recommendations and adapting legislation to keep up with state-of-the-art technology.

**Action area: Greater reliance on integrated solutions than ever before**

- R15: Processes and structures for different spatial levels and sectoral planning should be sought even more than before, such as integrated approaches in the planning process, and can be promoted with development procedures. Not least the experience of communal energy expansion plans or urban restructuring in the former GDR show that it is possible to come up with optimised infrastructure solutions through early coordination of development processes by municipal actors.
- R16: In the search for "integrated solutions", in addition to investigating their technical requirements there should also be intensive engagement with the necessary governance structures, *i.e.* the interaction between relevant actors in infrastructure planning and operation.
- R17: Integrated approaches in planning processes require those involved to have a variety of perspectives, varied knowledge and different interests. This is of great value (even though it can at times be "difficult"). Participation and mediation processes are important tools here.

**Action area: Raw materials – encouraging the recycling economy and reducing the environmental impact**

- R18: The recycling of building materials in infrastructure systems has considerable impacts on resource lightness and should therefore be systematically developed in all sectors and infrastructure components.
- R19: An increase in the recycling rate of building materials from infrastructure systems could be encouraged by financial incentives for their use, their inclusion as a criterion in the terms of reference in public tenders, the construction of (regional) secondary raw materials markets or the introduction of standards to safeguard quality.

**Action area: Acceleration of energy transition and forced phase-out of fossil fuels**

- R20: Following the phase-out of nuclear energy, coal should now be systematically phased out as rapidly as possible too.
- R21: When considering the flexibility options required for the forced expansion of renewable energy facilities (expansion of the electricity network, infeed and load management, smart grids, various storage facilities), in addition to current criteria such as system stability, safety, costs *etc*., resource use (raw materials, energy, GHG, land) involved in the construction, operation and maintenance of infrastructure structures should also be taken into account.
- R22: New facilities should be built where this is sensible in relation to power grids. In the choice of location, criteria such as urban sprawl and the detrimental impact on the countryside should also be considered.

**Action area: Consideration of land potential in infrastructure planning**

- R23: Land use in new infrastructure construction should be minimised.
- R24: A compulsory review of land use in infrastructure systems should be incorporated in land use planning and sectoral planning laws.

**Action area: Recognition of information and communications technologies as key technologies**

- R25: The push for broadband expansion should continue. When awarding investment subsidies, for example from state or federal support programmes, resource-light and future-proof technologies should be favoured.
- R26: Minimum requirements for the energy efficiency of data centres should be defined, similar to the Energy Conservation Regulations (EnEV) for buildings. This can be done at a European level (the Ecodesign Directive) or in conjunction with national support programmes.
- R27: With increasing dependency on data transfer, particular attention needs be paid to data protection and security. To achieve acceptance of new, networked technologies, civil society must participate in the development of reliable data transmission standards.
- R28: To maintain competition between ICT providers and avoid the construction of parallel ICT infrastructures, the interoperability of data transmission standards and software is crucial. Standardisation institutions are required to develop open standards that can be used by industry without proprietary limitations (*e.g.* for smart homes, smart meters, cross-sector networking).
- R29: The scientific basis for evaluating ICT resource requirements must be improved and relevant research activities stepped up.

# Einleitung

Technische Infrastruktursysteme der Ver- und Entsorgung mit Energie, Wasser/Abwasser, der Mobilität und der Informations- und Kommunikationstechnologien sind fundamental für das Leben in modernen Gesellschaften. Unsere Städte und ländlichen Regionen wären ohne technische Infrastrukturen nicht vorstellbar. Ihnen kommt eine grundlegende Bedeutung für gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung zu. Über diese Infrastruktursysteme werden enorme Ströme an Energie, Wasser, Informationen und Gütern „bewegt". Sie erschließen Räume, erfassen Umweltressourcen (z. B. Wasser, Gas), wandeln diese um, transportieren sie zum Ort des gesellschaftlichen Bedarfs und machen sie damit verfügbar und nutzbar. Infrastruktursysteme sind nicht nur als Instrumente der Umwandlung und Nutzbarmachung von Ressourcen relevant. Sie selbst nehmen mit ihrem Bau und ihrem Betrieb enorme Mengen an Umweltressourcen vielfältiger Art in Anspruch. Errichtung, Betrieb und Instandhaltung von technischen Infrastrukturen sind ressourcenintensiv. Für den weiteren Ausbau, die Sanierung und die Instandhaltung werden jährlich große Mengen an unterschiedlichen Materialien eingesetzt. Nur ein Bruchteil der benötigten Materialien wird im Zuge von Recycling aus den technischen Infrastrukturen selbst gewonnen. Im Laufe der Zeit entstand dadurch ein beträchtliches sogenanntes anthropogenes Lager im Infrastrukturbestand, das sich weiterhin im Wachstum befindet. So betrug im Jahr 2010 der in Verkehrs-, Wasser-/Abwasser- und Energieinfrastrukturen enthaltene Materialbestand an Beton schätzungsweise ca. 832,2 Mio. t, Stahl/Eisen 91,8 Mio. t, Kupfer 4,2 Mio. t, Aluminium 2,2 Mio.t. Jährlich kommen für diese drei Infrastrukturbereiche 9,8 Mio. t Beton, 1,4 Mio. t Stahl/Eisen, 48.000 t Kupfer und 44.000 t Aluminium hinzu [Projekt Materialeffizienz und Materialschonung (MaRess) AP 2.3, 2011]. Verbunden mit den zum Teil jahrzehntelangen Lebensdauern technischer Infrastrukturen wachsen die von Menschen geschaffenen Lagerstätten perspektivisch noch weiter an. Da einige Rohstoffe selten sind, zunehmend knapper und teurer werden, ist ein schonender Umgang mit denselben – auch im Bereich Infrastrukturen – nicht nur aus ökologischen Gründen anzustreben, sondern auch ökonomisch geboten. Zudem sind technische Infrastrukturen und deren Unterhalt ein erheblicher Kostenfaktor für die öffentliche Hand und/oder die Nutzer.

Da Errichtung, Betrieb, Instandhaltung und Reparatur von technischen Infrastrukturen einen erheblichen Anteil am gesellschaftlichen Materialinput haben, kann ihre zukunftsfähige und ressourcenleichte Gestaltung einen erheblichen Beitrag für die Umsetzung von Ressourceneffizienz- und Nachhaltigkeitspolitik leisten.

Sie sind daher unter umwelt- und klimapolitischen Gesichtspunkten von besonderem Interesse. Entsprechend fügt sich das Projekt „Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest" (RELIS) in den von der Bundesregierung in der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie (2002), dem Ressourceneffizienzprogramm (ProgRress 2012), dem Energiekonzept (2010), dem Aktionsprogramm Klimaschutz (2014) sowie dem von der Bundesregierung am 5.10.2106 ratifizierten Pariser Klimaschutzabkommen aufgespannten Zielrahmen ein. Einige herausragende angestrebte Ziele sind,

- den Ausstoß von Treibhausgas-Emissionen gegenüber 1990 um mindestens 40 Prozent bis 2020 und 80 bis 95 Prozent bis 2050 zu reduzieren,
- die Rohstoffproduktivität in Deutschland bis 2020 im Vergleich zu 1994 zu verdoppeln und
- den Neuzuwachs der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis 2020 auf 30 ha pro Tag zu vermindern.

Vor dem Hintergrund dieses Zielrahmens sowie verschiedener sogenannter „Megatrends" wird in den vergangenen Jahren verstärkt die Frage nach Formen und der Gestaltung zukunftsfähiger Infrastrukturen gestellt. Demografischer Wandel und Klimawandel wirken hier genauso wie gesellschaftlicher und technologischer Wandel und Innovation. Die Dekarbonisierung und in Deutschland der grundlegende Umbau der Energieversorgung im Rahmen der „Energiewende" sind maßgebliche Ziele, die Fra-

gen nach der zukünftigen Gestaltung und Funktion von technischen Infrastruktursystemen aufwerfen. Dabei wird – ausgehend von den klassischen Prinzipien der Daseinsvorsorge wie Universalität, Erschwinglichkeit, Zugänglichkeit – ein Reigen weiterer Anforderungen aufgespannt. Genannt seien beispielhaft Vulnerabilität und Resilienz (die Fähigkeit, bei eingetretenen Störungen, z. B. durch externe Einwirkung, Überlastung oder Defekte, den Zusammenbruch bzw. Ausfall von technischen Infrastrukturen abzuwenden und diese zeitnah in einen akzeptablen Zustand zurückzuversetzen), Flexibilität, Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz. Diesen Begriffen gegenüber ist „Ressourcenleichtigkeit“ ein vergleichsweise neu eingeführter Begriff, für den es bisher keine festgelegte Definition gibt.

Mit ressourcenleicht ist im Vorhaben RELIS die Minimierung von Ressourcenverbrauch während des gesamten Lebenszyklus von Infrastrukturen, d. h. Errichtung, Betrieb, Instandhaltung (Bau und Unterhalt), Rückbau und Entsorgung, gemeint. Als Ressourcen werden Materialien, Energie und Fläche betrachtet. Darüber hinaus wird Ressourcenleichtigkeit nicht nur im Sinne von *Ressourceneffizienz* verstanden, sondern um den Aspekt der Ressourcen*effektivität* ergänzt. Die Frage ist dann nicht nur, ob man das, was man macht, „richtig“ (d. h. effizient und gut) macht, sondern, ob man grundsätzlich „das Richtige“ macht – konkret auf den Projektkontext bezogen, ob die Infrastrukturen auch tatsächlich benötigt werden. Vor diesem Hintergrund wird Ressourcenleichtigkeit von Intrastrukturmaßnahmen mit den Parametern „Kumulierter Rohstoffaufwand“ (KRA), „Kumulierter Energieaufwand“ (KEA), dem Treibhausgasausstoß (THG) sowie der Flächeninanspruchnahme operationalisiert.

Infrastruktursysteme sind wie eingangs formuliert einerseits eine Voraussetzung für Wirtschaft und Gesellschaft und wirken somit auf diese ein. Andererseits werden Infrastruktursysteme aufgrund von Entscheidungen in Wirtschaft und Gesellschaft geplant, umgesetzt und finanziert. Insofern sind Infrastruktursysteme komplexe sozioökonomische und sozio-technische Systeme mit schwer voneinander abgrenzbaren technischen, wirtschaftlichen und institutionellen Subsystemen. Umweltbedingungen prägen diese maßgeblich.

Diese Faktoren werden im Rahmen dieses Vorhabens in einer möglichst ganzheitlichen Sichtweise infrastruktursystemübergreifend in den Blick genommen.

Der Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest“ (RELIS) ist in fünf Teile gegliedert: In Teil A erfolgt zunächst eine Einführung in das Vorhaben anhand einer Darstellung seiner Untersuchungsziele, des Forschungsgegenstands sowie des Aufbaus und der methodischen Grundlagen. In Teil B wird der Untersuchungsgegenstand, die vier Infrastruktursysteme Energie, Siedlungswasserwirtschaft, Verkehr und Informations- und Kommunikationstechnologien, einer Systembeschreibung und -analyse unterzogen. Es werden die Systemgrenzen für die orientierende Stoffstromanalyse definiert und Ansatzpunkte für die Entwicklung von Fallstudien identifiziert. In Teil C werden dann die grundlegenden Inputgrößen und Annahmen zur Berechnung von Stoffstromanalysen verschiedener Infrastrukturszenarien eingeführt und die Ergebnisse vorgestellt. Im Ergebnisse zeigen die orientierenden Stoffstromanalysen auf, wie sich die Infrastruktursysteme in verschiedenen Szenarien ihrer Gestaltung und Sektorkopplung bis zum Jahr 2050 mit Blick auf Ressourcenleichtigkeit entwickeln. Diese quantitativen Ergebnisse werden mit qualitativen und semiquantitativen Einschätzungen zu Kosten und Qualitäten erweitert. Teil D umfasst eine Auswahl von 20 Best-Practice-Beispielen, die aufzeigen, was heute schon im Sinne des Vorhabens RELIS möglich ist. Sie decken die verschiedenen Infrastrukturen in unterschiedlichen Kontexten wie z. B. städtische und ländliche Räume ab. Diese Sammlung an Beispielen ist dazu angelegt, sich einen Eindruck zu verschaffen und bei Interesse mit den Projekten bzw. ihren Akteuren in Kontakt zu treten. In Teil E münden die Ergebnisse und Diskussionen schließlich in Handlungsempfehlungen an Politik und Akteure in Bund, Ländern und Kommunen. Die Handlungsempfehlungen sind zwecks besserer Übersichtlichkeit in zehn Handlungsfelder gegliedert und jeweils mit Maßnahmen und Instrumenten unterlegt. Teil F als ausführlicher Anhang mit den zugrunde gelegten Daten und Infrastrukturbeständen rundet den Bericht ab.

# Teil A: Einführung und Methodik

## 1 Ziel und Gegenstand des Forschungsvorhabens

### 1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens RELIS ist es, Handlungsempfehlungen für eine ressourcenleichte, zukunftsfähige, umweltschonende Gestaltung der technischen Infrastruktursysteme Energie, Verkehr, Wasser/Abwasser sowie Informations- und Kommunikationstechnologien zu entwickeln. Die technischen Infrastrukturen werden systemisch und sektorenübergreifend betrachtet, um mögliche Synergien zwischen verschiedenen Infrastrukturen und mit anderen Politikfeldern erschließen zu können. Dabei sind wesentliche Veränderungsprozesse und Zukunftstrends wie etwa der demografische und Klimawandel, technologischer Wandel, schwankende und tendenziell steigende Rohstoffpreise, ökonomischer Strukturwandel sowie gesellschaftlicher Wandel zu berücksichtigen. Dabei sollte die ressourcenleichte Gestaltung der genannten Infrastrukturen jedoch ihre Funktionsfähigkeit ebenso wenig beeinträchtigen wie ihre Robustheit gegenüber negativen äußeren Einwirkungen und Funktionsstörungen etwa durch temporäre Über- oder Unterauslastung. Ferner müssen die Infrastruktursysteme langfristig ökonomisch tragfähig sein. Dieses mehrdimensionale und nicht immer widerspruchsfreie Zielsystem der Infrastrukturgestaltung bildet die Hintergrundfolie des Vorhabens.

Mit Hilfe einer systemischen, ganzheitlichen Betrachtung werden Vorschläge für die Optimierung bzw. Umgestaltung der betrachteten Infrastruktursysteme hinsichtlich der Inanspruchnahme von Ressourcen (Materialien, Energie und Fläche), der Kosten sowie qualitativer Gestaltungsmerkmale und Anforderungen (u.a. Flexibilität, Resilienz) erarbeitet. Folgende technische Infrastruktursysteme der Daseinsvorsorge differenziert nach den vier Sektoren werden im Rahmen des Vorhabens betrachtet:

- Verkehrsinfrastrukturen: Straße, Schiene, Binnenwasserstraßen, Luft;
- Energieversorgung: Strom, Wärme, Gas;
- Siedlungswasserwirtschaft: Wasserver- und Abwasserentsorgung;
- Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT).

Die Infrastruktursysteme können aufgrund ihrer vielfältigen Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten nicht einzeln betrachtet werden. Unter dem Stichwort „Sektorkopplung“[9] werden aktuell etwa im Zuge der Energiewende-Debatte neue oder auch nur sich verstärkende, bekannte Kopplungen zwischen Sektoren und Infrastruktursystemen diskutiert. Mit Blick auf die eingangs formulierten Ziele des Vorhabens besteht eine Aufgabe darin, die verschiedenen und vielfältigen Aspekte und Faktoren in der Entwicklung und Transformation von Infrastrukturen zu sortieren und zu systematisieren, um sektorenübergreifend zu einem Gesamtbild und Empfehlungen für die zukünftige Infrastrukturgestaltung zu kommen.

Damit scheint es an dieser Stelle angebracht, eine Einschränkung im Hinblick auf die Tiefe der technischen Darstellung einzelner Technikpfade und Technologiefelder zu machen. Auch wenn technische Elemente/Komponenten z. B. der Ver- und Entsorgungssysteme in den Bestandsaufnahmen, Fallbeispielen und Szenarien behandelt werden, kann es in diesem Vorhaben nicht darum gehen, alle Systemelemente, d. h. Anlagen und Netze, samt ihrer technischen Varianten im Detail zu beschreiben. Vielmehr soll ein systemischer Überblick über Infrastrukturen, ihre Teilsysteme und die einzelnen Komponenten vermittelt werden, der es erlaubt, nach Lösungen für die Gestaltung von Infrastruktursyste-

9 Vgl. hierzu etwa die Webseite des BMWi, https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2016/14/Meldung/direkt-erklaert.html; oder die der Deutschen Energieagentur dena: http://www.dena.de/suche/?q=Sektorkopplung&pid=3

men zu suchen. Entsprechende Handlungsspielräume (aber auch Zielkonflikte) für ggf. erforderliche Anpassungen sind auszuloten, um sektorenübergreifend zu einem Gesamtbild und plausiblen Empfehlungen für eine zukünftige ressourcenleichte Infrastrukturgestaltung zu kommen. So besteht eine Herausforderung in diesem Vorhaben insgesamt darin, die richtige Balance zu finden zwischen einerseits notwendiger, fachlicher (d. h. auch disziplinärer) Tiefe in den vielen Facetten und Aspekten der Infrastruktursysteme in den vier Sektoren und andererseits der interdisziplinären Verknüpfung spezifischer Wissensbestände zu einem systemischen Blick „auf das Ganze", d. h. über die Sektoren und disziplinären Grenzen hinweg.

## 1.2 Gegenstand der Untersuchung – Systemgrenzen der Infrastrukturen und ihrer Teilsysteme

Die genannten vier „technischen Basisinfrastrukturen" (BMI 2009, S. 5) in Deutschland sind Gegenstand und Ausgangspunkt der Betrachtung. Für die Analyse der Teilbereiche und insbesondere die Durchführung einer orientierenden Stoffstromanalyse (vgl. Teil C) ist es erforderlich, diese eindeutig voneinander abzugrenzen und so das Untersuchungsfeld zu bestimmen. Hierzu werden im Folgenden zehn Infrastrukturteilsysteme differenziert und ihre Systemgrenzen definiert: Strom, Gas und Wärme (Energie), Straße, Schiene, Wasserstraße und Luftverkehr (Verkehr), Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung sowie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT).

Neben der Definition der materiell-physischen Systemgrenzen als Grundlage für die Erhebung und klare Zuordnung des Infrastrukturbestands nach Teilsystemen ist auch die Bestimmung des Lebenszyklus-Ansatzes für die Auswertung und Einordnung der Ergebnisse wichtig. „Ressourcenleichtigkeit" umfasst im Vorhaben RELIS die Materialien-, Energie- und Flächeninanspruchnahmen im Rahmen der Bauphase von Infrastrukturen sowie der Instandhaltung (Bau und Unterhalt), ihres Betriebs, des Rückbaus und der finalen Entsorgung bzw. Wiederverwertung. Damit fällt die eigentliche Nutzung der Infrastruktur durch die Endnutzer nicht in die Betrachtung. „Mobile Elemente" der Sektoren werden nicht mit erfasst. Das heißt für die Infrastrukturen des Straßenverkehrs, dass weder die Materialien zum Bau der Fahrzeuge noch Kraftstoffe für den Betrieb der Fahrzeuge erfasst werden; im IKT-Sektor fallen alle Endgeräte unter diese Vereinbarung und damit aus den Systemgrenzen heraus. Da diese Elemente insbesondere in Hinblick auf die Umgestaltung der Verkehrsinfrastruktur von herausragender Bedeutung sind, werden sie in Teil C teilweise in Exkursen beleuchtet.

Folgende Systemgrenzen für die orientierende Stoffstromanalyse wurden im Rahmen des Vorhabens gezogen.

### 1.2.1 Systemgrenzen der Energieversorgungssysteme

Die Energieversorgung wird im Vorhaben in die Teilsysteme der Strom-, Wärme- und Gasversorgung unterteilt.

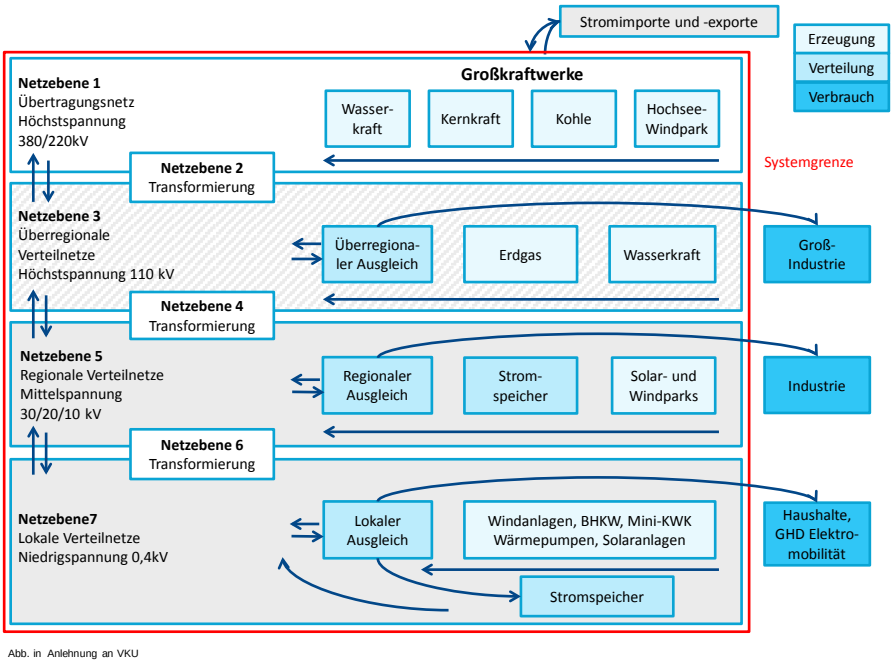
Folgende wichtige Festlegungen wurden für die Energieversorgung getroffen:

- Bezugsraum der Bilanzgrenzen ist Deutschland: inländische Bedarfe/Nachfrage nach Energie sowie inländische Erzeugungskapazitäten (Wärmeversorgung ist ohnehin regional/lokal); davon unabhängig ist die Frage des Imports von Primärenergieträgern.
- (Strom-)Zähler bilden die Schnittstelle zwischen öffentlichem Netz und Gebäudeinstallationen. Als Systemkomponente der Netze werden sie mit erfasst.
- Dezentrale Erzeugungskapazitäten und Speicher (Strom und Wärme) werden erfasst – soweit die Datenverfügbarkeit dies zulässt.
- Unberücksichtigt bleibt die Haustechnik (Sicherungen, Kabel, Heizungen etc.)
- Kälteversorgung wird mit erfasst, da diese perspektivisch möglicherweise relevant wird.

- Elektrizitätsinfrastruktur im Verkehr (Oberleitungssystem der Bahn, Ladesäulen für Elektrofahrzeuge) sowie Tankstellen werden dem Verkehrssystem zugeschlagen.

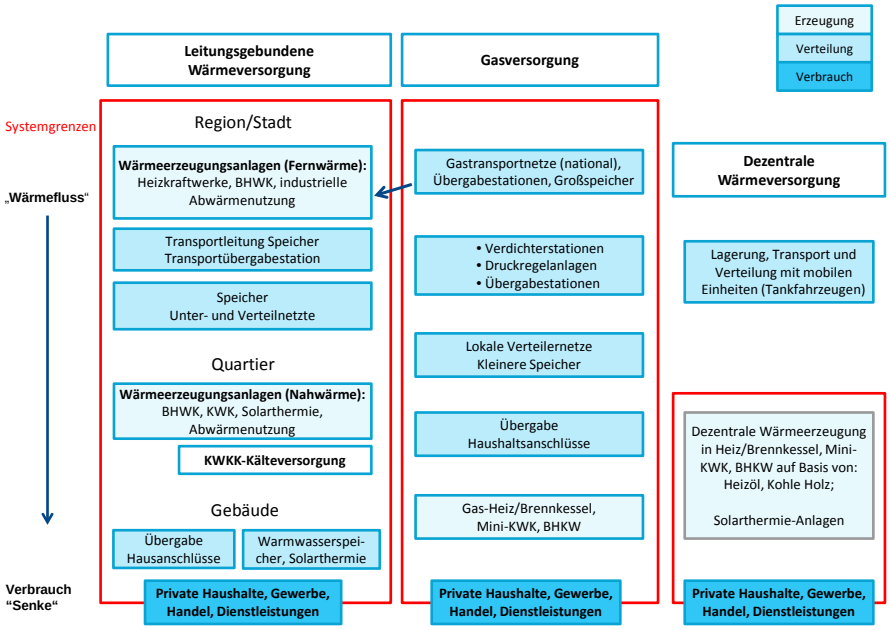
Mit den genannten Festlegungen ergeben sich folgende Bilder der Systemgrenzen:

Abbildung 3: Systemgrenze Stromversorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 4: Systemgrenze Wärme- und Gasversorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS

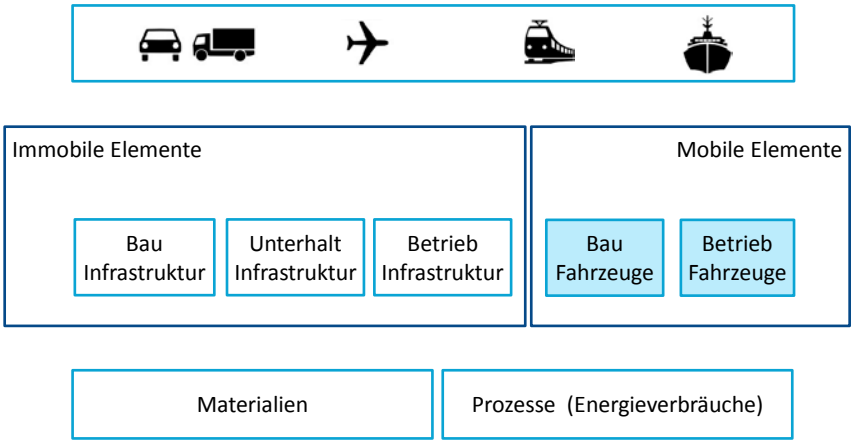



Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.2.2 Systemgrenzen Verkehr

Der Verkehrssektor wird in die Teilsysteme Straße, Schiene, Wasserstraße und Luftverkehr differenziert. Die zentrale Prämisse für den Verkehrssektor liegt in der Konzentration auf die immobilen Infrastrukturen. Demnach werden Fahrzeuge nicht in die Analysen einbezogen.[10]

Abbildung 5: Elemente zur Bestimmung der Systemgrenzen Verkehr




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Folgende wichtige Festlegungen wurden für den Verkehrssektor getroffen:

- Private Verkehrsinfrastruktur bleibt bei Straßenverkehr unberücksichtigt.
- Fernleitungen (Gas & Öl) werden der Energieversorgung zugeschrieben.

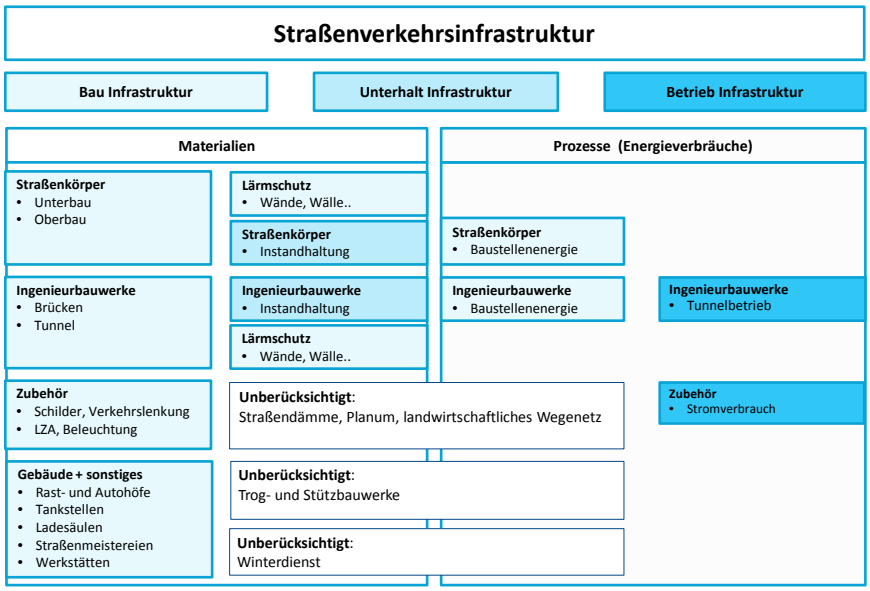
In der orientierenden Stoffstromanalyse sind folgende Elemente **nicht** in die Berechnung eingegangen:

- Straßeninfrastruktur (unberücksichtigte Elemente): Straßendämme, Planum, landwirtschaftliches Wegenetz, Trog- und Stützbauwerke;
- Schieneninfrastruktur (unberücksichtigte Elemente): einige Steuereinrichtungen (Gleisbremsen usw.), Straßen zur Wartung, Zäune, Kanalisation, Dämme;
- Luftverkehrsinfrastruktur (unberücksichtigte Elemente): Planum, Enteisung, Flugsicherung auf externem Gelände;
- Binnenschifffahrtsinfrastruktur (unberücksichtigte Elemente): Hochwasserschutz.

10 In Exkursen werden in Teil C die Fahrzeuge im Straßenverkehr (Kapitel 7.3.5) sowie der durch den Betrieb bedingte Energieverbrauch des Verkehrssektors (Kapitel 7.4.5) beleuchtet.

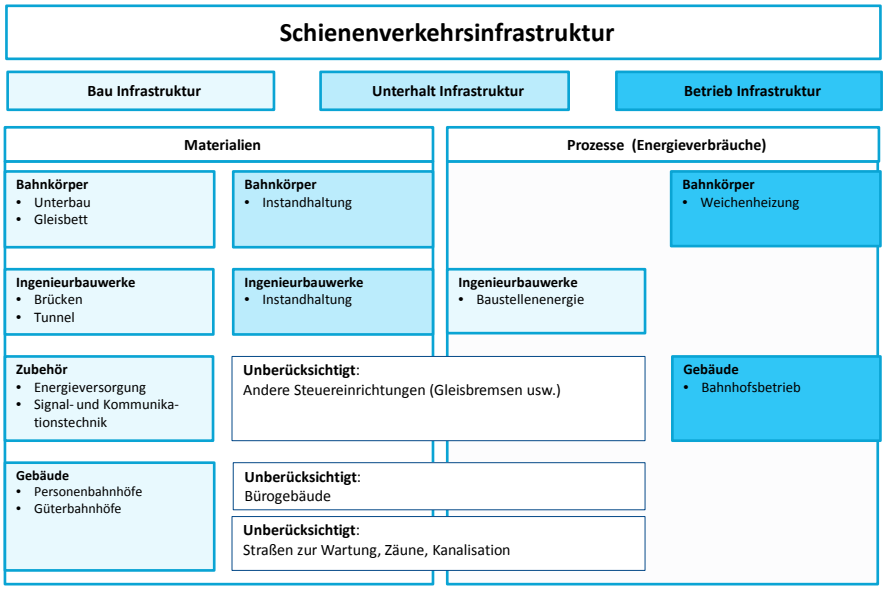
Mit den genannten Festlegungen ergeben sich folgende Bilder der Systemgrenzen:

Abbildung 6: Systemgrenze Straßenverkehrsinfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS



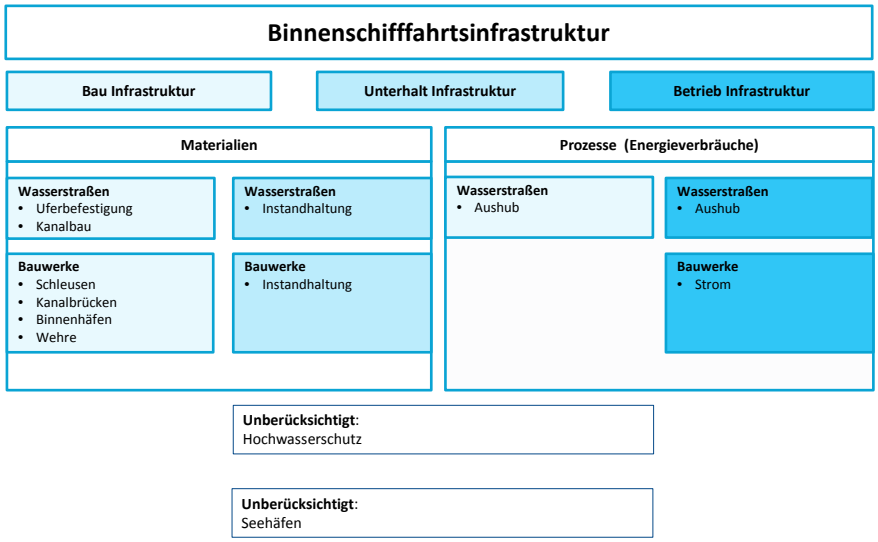

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 7: Systemgrenze Schieneninfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS



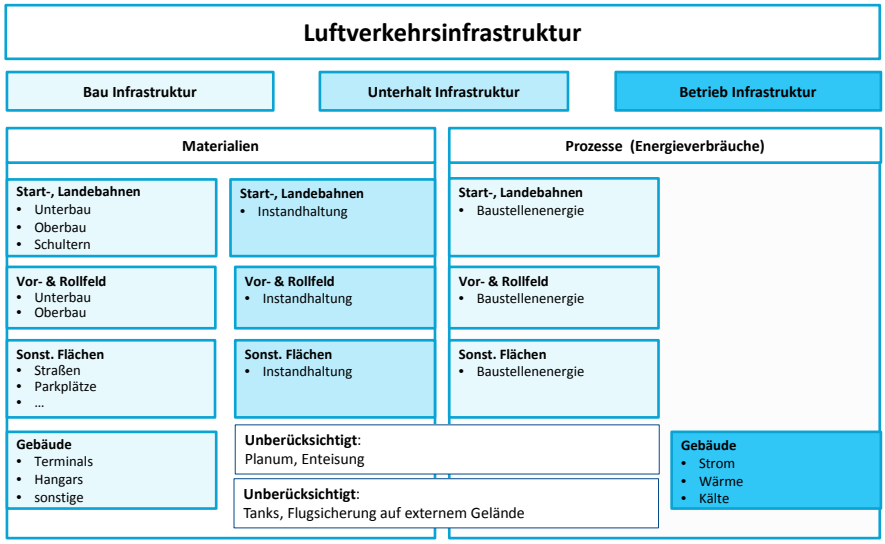

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 8: Systemgrenze Wasserverkehrsinfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 9: Systemgrenze Luftverkehrsinfrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.2.3 Systemgrenzen der öffentlichen Wasserwirtschaft

Mit dem Adjektiv „öffentlich“ wird im Titel dieses Unterkapitel bereits eine zentrale Festlegung bzw. Einschränkung für die Definition der Systemgrenzen getroffen. Eine öffentliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung liegt vor, wenn Dritte „nicht nur vorübergehend und in einem nicht nur untergeordneten Umfang mit Trink- oder Brauchwasser versorgt werden“ (Tietz 2007, S. 189) bzw. von Abwasser entsorgt werden. Die Eigengewinnung und -nutzung von Wasser für Produktionszwecke (Industrie) oder Kühlwasser in der Energieversorgung fällt damit heraus. Siedlungswasserwirtschaft organisiert den Umgang mit Trinkwasser, Betriebswasser, Abwasser und Niederschlagswasser im räumlichen Kontext von Siedlungen.

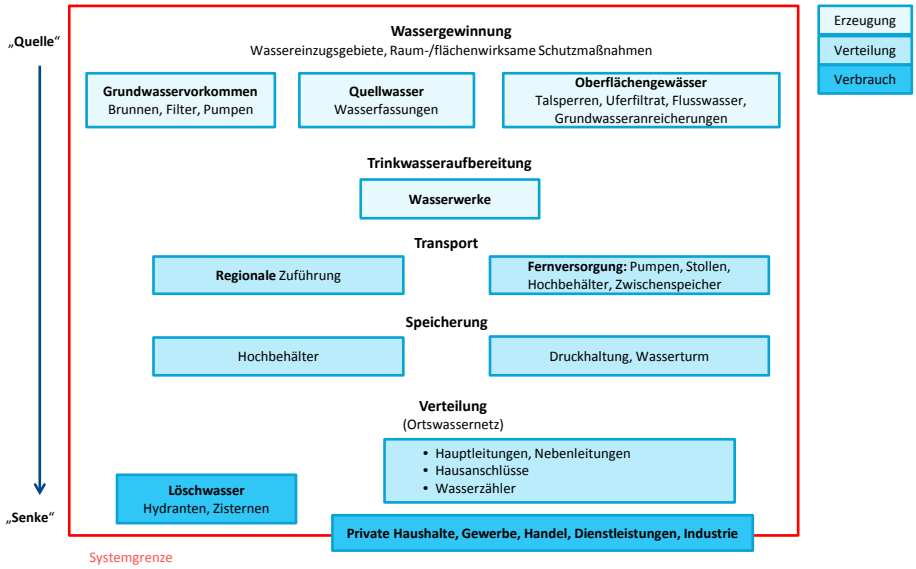
Folgende wichtigen Festlegungen wurden für die Definition der Systemgrenzen der Siedlungswasserwirtschaft im Vorhaben getroffen:

- Anlagen und Netze der nicht-öffentlichen Wasserversorgung (Eigengewinnung von Wasser für Produktionszwecke, Landwirtschaft, Kühlwasser etc.) werden im weiteren Vorhaben nicht mit untersucht.
- Wasserkraftanlagen werden im Energiesystem mit erfasst, Hochwasserschutzanlagen (Deiche, Wehre) fallen nicht in die Systemgrenzen.
- Die Behandlung und Aufbereitung von Klärschlamm (insb. dessen Entwässerung) wird als integraler Teil der Abwasserbehandlung verstanden. Die weitere Verwertung (sei es als Düngemittel oder Bioenergiequelle) hingegen wird nicht als Teil der Abwasserentsorgung betrachtet und liegt außerhalb der Systemgrenzen.[11]
- Zur Erfassung der Abwassernetze wird der Austritt des Abwasserrohres aus dem Haus angenommen. (Damit wird auch eine größere Übereinstimmung mit der Systemgrenze für die Wasserversorgung erzielt, bei der der Wasserzähler am/im Haus als Grenze definiert ist.)
- Die Abwasserrohre im Haus und die häuslichen Sanitäreinrichtungen werden nicht mit erfasst, da sie nicht Teil öffentlichen Infrastruktur sind.

Mit den genannten Festlegungen ergeben sich die in den Abbildungen 9-11 dargestellten Systemgrenzen.

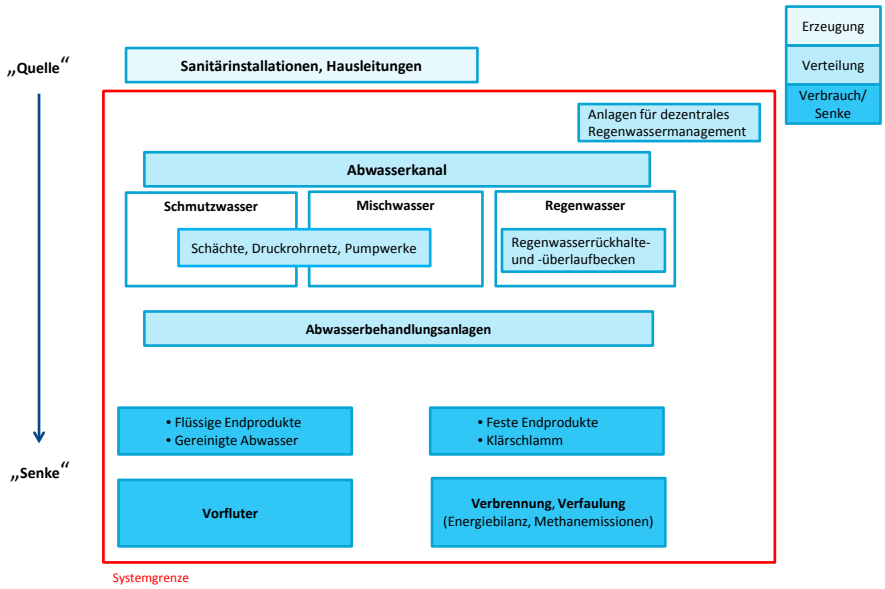
11 Die Verwendung von Klärschlamm zur Biogaserzeugung wird im Energiesystem unter den Erzeugungskapazitäten und Anlagen bilanziert. Die „Verwertung“ der Klärschlämme in der Landwirtschaft bleibt außerhalb der Systemgrenzen, da hier auch völlig neue Rechtsregime angesprochen sind. Grundsätzlich sind die Grenzen des Systems der Abwasserbehandlung zum Energiesystem und zur Abfallentsorgung fließend.

Abbildung 10: Systemgrenze öffentliche Trinkwasserversorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 11: Systemgrenze Abwasserentsorgung im Rahmen des Vorhabens RELIS



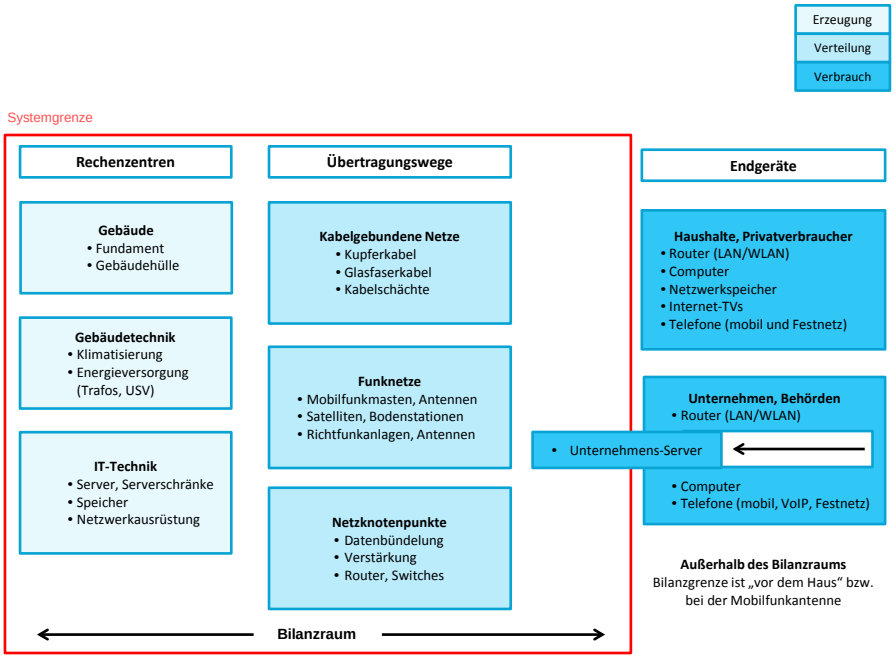

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.2.4 Systemgrenzen der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

Für den IKT-Sektor wurden folgende Elemente und Prozesse aus der Bilanzierung ausgeklammert:

- Endgeräte; Bilanzgrenze ist der Netzübergabepunkt „vor dem Haus“ bzw. die Mobilfunkantenne des Anbieters;
- Dienstleistungen zur Kundenbetreuung von IKT-Kunden (z. B. Callcenter des Anbieters, Verwaltung, Vor-Ort-Service);
- Herstellungsaufwand für eingesetzte Geräte (Elektronik) und Materialien → reine Massenbilanz.

Abbildung 12: Systemgrenzen IKT-Infrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS




Quelle: Difu/Öko-Institut.

# 2 Vorgehen und methodische Grundlagen

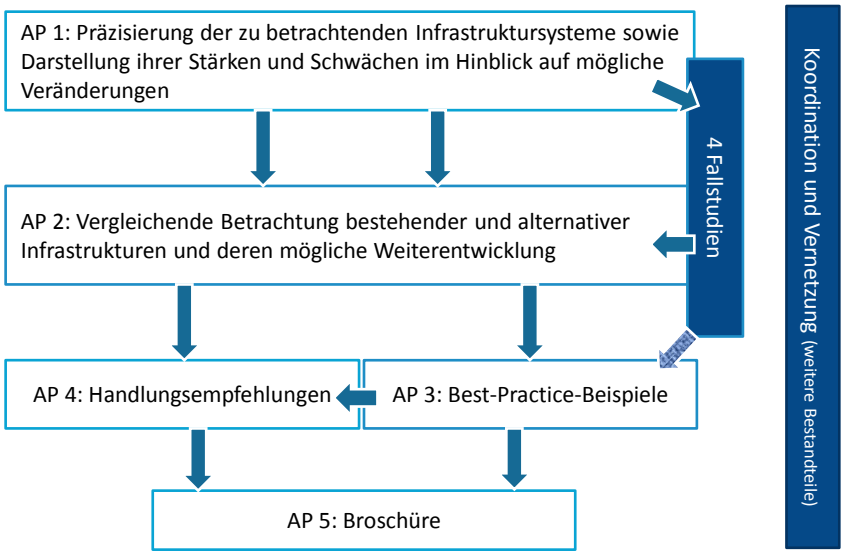
Im Vorhaben RELIS werden quantitative und qualitative Methoden und Ansätze verschnitten. Die kontinuierliche Rückkopplung und Diskussion der Zwischenergebnisse mit Experten des Umweltbundesamtes (Auftraggeber) sowie mit externen Fachleuten im Rahmen von Workshops und eines Projektbeirats waren ein zentraler Bestandteil. Grundlegend baut das Vorhaben auf einem Vergleich verschiedener Szenarien mit dem Zeithorizont 2050 auf. Einem Referenzszenario („Aktuelle Maßnahmen“) werden normative Szenarien ressourcenleichter Infrastrukturen („Fallstudien“) gegenübergestellt. Die Auswertung erfolgt mithilfe von Ergebnissen einer orientierenden Stoffstromanalyse sowie qualitativen Analysen und Kostenabschätzungen. Flankiert bzw. untermauert werden diese Auswertung mit einer Zusammenstellung von Best-Practice-Beispielen im Untersuchungsfeld.

In der Gesamtschau der Ergebnisse werden Empfehlungen zur Gestaltung ressourcenleichter zukunftsfähiger Infrastrukturen entwickelt, die mit Maßnahmen und Instrumenten hinterlegt sind.

Dieses Vorgehen bildet sich in der im Folgenden dargestellten Struktur des Vorhabens ab.

## 2.1 Struktur des Vorhabens

Abbildung 13: Struktur des Vorhabens




Quelle: Difu/Öko-Institut.

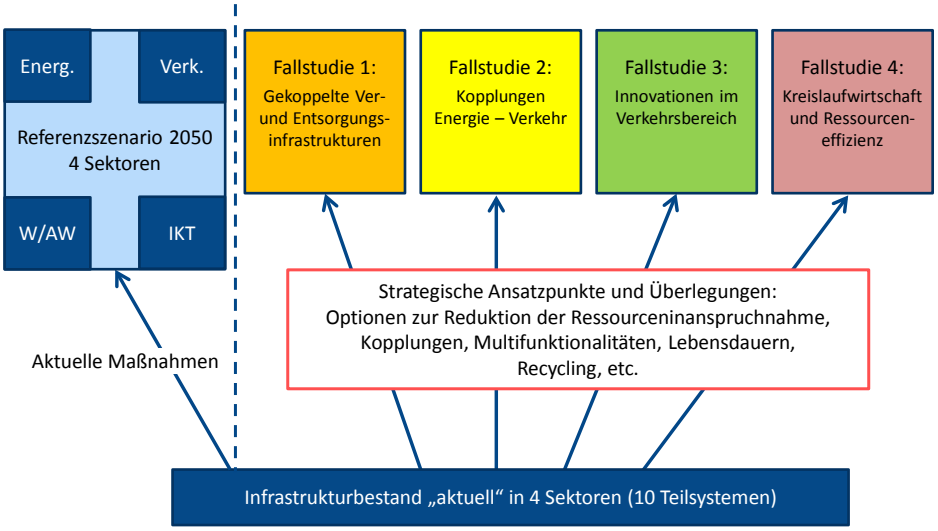
Ziel des ersten Arbeitspakets war es, die Infrastruktursysteme mit ihren jeweiligen Stärken und Schwächen zu präzisieren und eine breite Informationsbasis für die weiteren Untersuchungen aufzubauen. Hierzu erfolgte für die vier Infrastrukturbereiche eine umfassende Bestandsaufnahme der Infrastruktursysteme (Netze, Anlagen, Komponenten) in Deutschland. Ebenso wurden entsprechende Kennziffern und Materialkoeffizienten zur Bestimmung der im Infrastrukturbestand eingesetzten Materialmengen sowie der Flächen- und Energieinanspruchnahme bestimmt. Ferner wurden wesentliche externe Veränderungsprozesse und Zukunftstrends dargestellt, die Auswirkungen auf die Infrastrukturbereiche haben. Sie bilden den Rahmen für mögliche Handlungs- und Gestaltungsoptionen ressourcenleichter Infrastrukturen. Darauf aufbauend wurden Optionen zur Reduktion der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen herausgearbeitet und schlussendlich für die einzelnen Infrastruktursysteme spezifische „Strengths and Weaknesses“ sowie „Opportunities and Threats“ abgeleitet. Mittels dieser SWOT-Analyse wurden strategische Ansatzpunkte für eine ressourcenleichte Gestaltung/Umgestaltung der Infrastrukturteilsysteme identifiziert, die in weiteren iterativen Analyseschritten zu Strategiebündeln aggregiert und schließlich in vier Fallstudien ressourcenleichter Infrastruktursysteme für weitere, vertiefende Analysen operationalisiert wurden.

Zur Entwicklung der vier Fallstudien wurden die Ergebnisse der Teilsystem-Analysen zum einen weiter verdichtet, indem die zentralen Argumente kondensiert wurden. Zum anderen wurde in einer sektorenübergreifenden Perspektive gezielt nach Möglichkeiten der Kopplung verschiedener Teilsysteme gesucht. Die vier Fallstudien sowie das Referenzszenario wurden im Rahmen einer orientierenden Stoffstromanalyse quantitativ miteinander verglichen (zum methodischen Vorgehen bei der orientierenden Stoffstromanalyse vgl. Teil A, Kapitel 2.2.1). Auch wurde eine Kostenabschätzung für die Fallstudien und das Referenzszenario vorgenommen, um zu prüfen, inwiefern die Fallstudien in ihrer Umsetzung finanzierbar sind (vgl. Teil C). Teil dieser Untersuchungen ist darüber hinaus eine qualitative Bewertung der Fallstudien hinsichtlich qualitativer Kriterien wie Resilienz, Flexibilität, Reversibilität

und Teilhabemöglichkeiten für Bürger (vgl. Teil C). Der Methodenmix aus quantitativen, semiquantitativen und qualitativen Ansätzen gewährleistet eine umfassende Betrachtung. Durch den Abgleich der vier Fallstudien mit dem Referenzszenario kann das Potenzial in Hinblick auf eine ressourcenleichte Gestaltung der Infrastruktursysteme besser abgeschätzt werden.

Die in den analytischen Arbeitsschritten gewonnenen Erkenntnisse werden von der Recherche und Erstellung einer Auswahl von Best-Practice-Beispielen (Teil D) unterfüttert. Die Auswahl der Beispiele orientiert sich an den vier Infrastrukturbereichen, den zentralen Problemlagen und Herausforderungen der Infrastrukturgestaltung. Sie deckt einen breiten räumlichen wie institutionellen Kontext ab. In einem partizipativen Prozess wurden sie hinsichtlich der, auch für die vier Fallstudien angelegten, qualitativen Kriterien bewertet und konnten so bei der Aufstellung von Handlungsempfehlungen berücksichtigt werden.

Abbildung 14: Grundstruktur und Verhältnis der Szenarien im Vorhaben




Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 2.2 Methodische Grundlagen

Im Folgenden werden die methodischen Grundlagen der Untersuchung eingeführt. Mittels einer „orientierenden Stoffstromanalyse“ sind quantifizierbare Aussagen zur Inanspruchnahme von Materialien, Energie und Flächen möglich. Mit dieser orientierenden Stoffstromanalyse werden demnach Aussagen zur Ressourcenleichtigkeit ermöglicht. Dieser quantitative Ansatz wird zur vertiefenden Untersuchung der Umsetzbarkeit und Zukunftsfähigkeit der Fallstudien durch eine semiquantitative Kostenabschätzung sowie eine Abschätzung anhand eines Sets qualitativer Merkmale erweitert. In der explorativen Phase des Vorhabens zur Entwicklung von normativen Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen wurde die Methode der SWOT-Analyse gewählt.

### 2.2.1 Orientierende Stoffstromanalyse der Infrastrukturen

Die orientierende Stoffstromanalyse der Infrastrukturen bezieht sich auf deren gesamten Lebenszyklus und umfasst damit die quantitative Analyse zur Errichtung/Bau und Instandhaltung (Wartung, Reparatur), Betrieb und Rückbau der Infrastrukturen. Die Nutzung der besonders relevanten Infrastrukturen wird durch die Systemgrenzen zwar ausgeschlossen, nichtsdestotrotz aber für die wichtigen Bereiche in Exkursen dargestellt.

Eine Stoffstromanalyse dient der Quantifizierung von Umweltauswirkungen eines definierten Systems. Sie ähnelt einer Ökobilanz, wobei der wesentliche Unterschied in der Bezugsgröße liegt. In Abgrenzung zu einer Ökobilanz hat eine Stoffstromanalyse bei der Systembeschreibung keinen direkten Fokus auf die Bereitstellung von Produkten oder Dienstleistungen. Das System wird mit einem stärkeren Fokus auf räumliche und zeitliche Grenzen abgesteckt. Die räumlich-zeitliche Dimensionierung bringt eine Betrachtung nicht nur der Flüsse über die Grenzen des Systems hinaus, sondern auch der dem System innewohnenden Lager mit sich. Diese werden im Rahmen von RELIS mit den Wirkungsparametern Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) und Kumulierter Energieaufwand (KEA) erfasst.

Zur Erfassung der Umweltwirkungen wird den elementaren Flüssen (z. B. $CO_2$-Emissionen oder Stickoxide), welche das beschriebene System verlassen, über einen Charakterisierungsfaktor eine Wirkung in Wirkungskategorien (z. B. Treibhauseffekt) zugeordnet. In RELIS werden diese als Gesamttreibhauspotenzial in $CO_2$-Äquivalenten (THG) ausgewiesen.

#### 2.2.1.1 Wirkungskategorien

Die folgenden Wirkungskategorien werden in der orientierenden Stoffstromanalyse berücksichtigt.

**Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)** ist die Summe aller in ein System eingehender Rohstoffe, ausgedrückt in Gewichtseinheiten (kg/Tonne). Nicht berücksichtigt werden Luft und Wasser. Vor Ort bleibender Abraum bleibt im KRA ebenfalls unberücksichtigt. KRA ist ein Summenparameter, der keinerlei Aussage über die Knappheit der Rohstoffe oder die mit der Entnahme verbundenen Umweltauswirkungen ermöglicht. Neben dem KRA wird im Forschungsvorhaben RELIS deshalb auch eine Aussage zur Menge der einzelnen Materialien bzw. Energieträgern getroffen.

**Kumulierter Energieaufwand (KEA)** ist eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Energieressourcen (Primärenergien) im Zusammenhang der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines Produkts oder einer Dienstleistung (z. B. in MJ/Tonne).

Schadstoffe, die zur zusätzlichen Erwärmung der Erdatmosphäre beitragen, werden unter Berücksichtigung ihres Treibhauspotenzials bilanziert, welches das Treibhauspotenzial des Einzelstoffs relativ zu Kohlenstoffdioxid kennzeichnet. Als Indikator wird das **Gesamttreibhauspotenzial in $CO_2$-Äquivalenten (THG)** angegeben (in kg $CO_2$-äq./Tonne).

Darüber hinaus erlauben es die Inputgrößen der Bestandsaufnahme, die **Flächeninanspruchnahme** der Infrastrukturteilsysteme darzustellen. Dabei wird der Flächenverbrauch für versiegelte Flächen angegeben. Eine konsistente Erhebung der Flächennutzung für alle relevanten Baukörper und die Zuordnung zu den Kategorien ist neben dem Materialbedarf separat zu erheben und selbst für eine eher grobe Einordnung nicht einfach. Für jeden Baukörper muss recherchiert werden, welche spezifischen Flächennutzungswerte erfasst und ausgewertet werden können. Zum Beispiel ist bei der Flächennutzung von Stromleitungsnetzen zu unterscheiden zwischen Freileitungen und Erdleitungen. Bei Freileitungen ändern sich so zum Beispiel die versiegelte Fläche je nach Spannungsebene durch die Größe der Maste sowie auch die unter den Leitungen beschränkt nutzbare Fläche.

#### 2.2.1.2 Methodik der orientierenden Stoffstromanalyse

Ein wesentlicher Schritt einer Stoffstromanalyse ist die Erfassung

- des spezifischen Materialbestands der Infrastrukturbestandteile (z. B. Menge Asphalt pro km Autobahn; Gusseisen pro m Rohrleitung),
- des Mengengerüsts[12] (z. B. Länge des Straßennetzes in Deutschland) und
- der Lebensdauern einzelner Infrastrukturbestandteile.

Werden diese Daten verknüpft, ergeben sich jährliche Materialmengen. Die Berechnung der Umweltwirkungen infolge von Bau, Betrieb und Wartung/Instandhaltung der Infrastruktur erfolgte dann auf Basis der eingesetzten Materialien und ihrer Mengen. Hierbei wurden die Umweltauswirkungen berücksichtigt, die bei der Gewinnung der Rohstoffe sowie deren Transport und deren Verarbeitung zu den Grundmaterialien (wie z. B. Beton, Stahl, Kupfer) entstehen. Nicht berücksichtigt wurden die Umweltauswirkungen, welche bei der Verarbeitung der Grundmaterialien zu den Endprodukten entstehen.

Während die so berechneten Umweltwirkungen infolge der Wartung dem Betrachtungsjahr direkt zugeordnet werden können, ist dies beim Bau der Infrastruktur nicht möglich. Die hierfür ermittelten Umweltwirkungen, berechnet über die verbauten Materialien, werden im nächsten Schritt noch über die Lebensdauer bezogen auf ein Jahr als Koeffizient umgerechnet. Hat ein Bauwerk oder ein Teilsystem eines Bauwerks eine Lebensdauer von x Jahren, sind für die jährlich zu berücksichtigenden Umweltwirkungen 1/x des Gesamtressourceneinsatzes für die Berechnung heranzuziehen.

Diese berechneten Materialmengen wurden mit generischen Daten (Emissionsfaktoren) belegt, woraus sich dann die Gesamtwirkung der betrachteten Wirkungskategorien (kumulierter Rohstoffaufwand [KRA], kumulierter Energieaufwand [KEA] und Treibhausgasemissionen [THG]) je Infrastrukturteilsystem ergibt. Darüber hinaus wurde der Infrastrukturbestand mit Flächenkennzahlen z. B. zur versiegelten Fläche pro km Autobahn verknüpft, um die Flächeninanspruchnahme zu ermitteln.

Die Umweltwirkungen der Infrastrukturen, die bereits vor Jahren gebaut wurden, werden in dieser Studie mit den heutigen Faktoren bewertet. Dies ist eine notwendige Vereinfachung, auch wenn heute oftmals neue Technologien zur Herstellung der Materialien zum Einsatz kommen, die früher noch nicht verfügbar waren, oder die Emissionen der zur Herstellung verwendeten Hilfsenergie (z. B. Strom) und Hilfsprozesse (z. B. Transporte) von damals nicht mit heute vergleichbar sind. Diese Vorgehensweise wurde in der Regel auch in den bisher publizierten Studien in diesem Bereich gewählt (Maibach et al. 1999; Spielmann et al. 1996; Köser et al. 2002; Frischknecht/Stucki 2009; Schmied/Mottschall 2013).

Neben der Bewertung der für den Bau notwendigen Materialien wird auch der Energieeinsatz der Bauprozesse mit erfasst. Es wurden 17 Cluster gebildet, um die Bauaktivitäten in Gruppen zu gliedern. Diesen Clustern werden Bauprozesse aus der Ökobilanzdatenbank EcoInvent zugeordnet. Aus den Bauprozessen werden dann Energieaufwendungen (Strom, Diesel) pro Tonne Referenzmaterial abgeleitet. Über die jährlichen Materialflüsse können energetische Aufwendungen für den Bau berechnet werden.

Im Folgenden wird das Vorgehen an einem Beispiel erläutert: Das Niederdrucknetz der Regional- und Ortsnetze für die Erdgasversorgung wurde dem Cluster Rohrnetz Nah zugeordnet. Der zugrunde liegende Prozess der Ecoinvent Datenbank „pipeline construction, natural gas, low pressure distribution network, CH“ enthält Informationen über die Material-, aber auch Energieaufwendungen pro verlegtem Rohrkilometer. Als Referenzmaterial wurde hier Stahl ausgewählt. Über das Verhältnis von ener-

12 Das erfasste Mengengerüst für ein aktuelles Bezugsjahr ist im Teil F (Anhang) dokumentiert.

getischem Bauprozessaufwand zu eingesetztem Stahl kann ein Faktor ermittelt werden, über den die Bauenergie anhand der Materialflüsse berechnet werden kann. In diesem Fall 0 MWh Strom und 0,207 t Diesel pro eingesetzter Tonne Stahl.

Der Energiebedarf durch den Betrieb der Infrastrukturen wird im Basisjahr zuerst losgelöst von der Stoffstrombilanzierung für jeden einzelnen Sektor (bis auf den Energiesektor) im Gesamten ermittelt. Dann wird ein Faktor ermittelt, welcher den Energiebedarf ins Verhältnis zu einer bestimmenden Infrastrukturkomponente des Sektors stellt. Für die folgenden Zeitscheiben wird der Energiebedarf dann an diesen Infrastrukturkomponenten kalibriert. Effizienzgewinne werden dabei nicht betrachtet.

Als Beispiel: Der Energieaufwand für den Betrieb des Straßenverkehrs beinhaltet Beleuchtung, Tunnelbetrieb und Lichtzeichenanlagen. Der ermittelte Energiebedarf für den Straßenverkehr wird bezogen auf die gesamte Straßenlänge im Basisjahr und für weitere Zeitscheiben oder Fallstudien daran skaliert. Der Betrieb der Energieinfrastrukturen wird in dieser Studie als Differenz zwischen Brutto- und Nettostromerzeugung definiert. Diese sind für verschiedene Kraftwerke und Jahre aus Studien verfügbar.

Für den Betrieb der Infrastrukturen werden die mit der Produktion der Energie verbundenen Umweltwirkungen unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste berechnet. Wie bei Wartungsmaßnahmen ist dieser Energieverbrauch genau dem Betrachtungsjahr zugeordnet, weshalb keine weiteren Allokationen über die Lebensdauern nötig sind.

Recyclingmaterialien werden auf der Inputseite berücksichtigt, jedoch ohne Betrachtung der Umweltauswirkungen aus früheren Lebenszyklen. Damit werden auf der Output-Seite keine Gutschriften für das Recycling von Abfällen bzw. Reststoffen angerechnet (sogenannte Cut-Off-Methode); Recyclinggutschriften werden nur auf der Input-Seite vergeben. Konkret bedeutet dies, dass im Regelfall mit typischen Produktmixen aus Primär- und Sekundärmaterialien gerechnet wird, da für die meisten eingesetzten Materialien die Recyclinganteile nicht bekannt sind. Liegen aber entsprechende Informationen vor, werden diese berücksichtigt.

Prozesse und Aktivitäten, die zusammen mit nicht mehr als einem Prozent zu den Gesamtumweltauswirkungen beitragen, können vernachlässigt werden. Diese Regel wird im Rahmen der Stoffstromanalyse auf die Teilsysteme bezogen, um ihre genaue Beschreibung zu gewährleisten. Wenn keine Umweltauswirkungen bekannt sind, kann die 1-Prozent-Regel auch auf die eingesetzten Materialmengen bezogen werden. Diese Regel wurde bei den berücksichtigten Materialien angewendet.

Die Kennzahlen für den Betrieb der Infrastruktur werden ebenso mit in die Wirkungsbewertung aufgenommen. In den abschließenden Betrachtungen wurden diese Kennzahlen bestimmt und gesondert dargestellt. Dabei können alle zuvor genannten Indikatoren ausgewertet werden. Die gesonderte Darstellung ist notwendig, da sich ansonsten Inkonsistenzen zwischen den Infrastruktursektoren ergeben.

Zur Erläuterung sollen Beispiele von zwei Infrastruktursektoren erörtert werden: Grundsätzlich wurde im Rahmen der Systemgrenzen beschlossen, mobile Elemente der Sektoren nicht mit zu erfassen. Das heißt für die Infrastrukturen des Straßenverkehrs, dass weder die Materialien zum Bau der Fahrzeuge noch Kraftstoffe für den Betrieb der Fahrzeuge erfasst werden.[13]

Weiterhin ist festzuhalten, dass der Energieverbrauch für den Betrieb der Fahrzeuge verhältnismäßig groß im Vergleich zum Betrieb der Infrastrukturen ist. Bei verkehrsverlagernden Fallstudien ergeben sich veränderte Transportleistungen, die auf den Infrastruktursystemen erbracht werden. Die sich daraus ergebenden Veränderungen des Energieverbrauches werden mit dem TEMPS-Modell (Transport-Emission & Policy Scenario) des Öko-Instituts ermittelt. Die Effekte von Verkehrsverlagerung

13 Der Kraftstoffverbrauch ist die Größe, welche in direktem Verhältnis zur Nutzung der Straßen steht.

wurden entsprechend der Klimaschutzszenarien berücksichtigt, welche mit dem TEMPS-Modell berechnet worden sind.

Betrachten wir nun unter den gleichen Gesichtspunkten die Trinkwasserversorgung. Hier ist das Äquivalent zum Energieverbrauch der Fahrzeuge, also dem direkten zusätzlichen Energieverbrauch bei Nutzung der Infrastrukturen, die nötige Pumpenergie zur Förderung des Trinkwassers aus Brunnen und Quellen und im Rohrleitungssystem. Auch dieser Energieverbrauch ist im Vergleich zu anderen betrieblich bedingten Energieverbräuchen für den Trinkwassersektor der dominierende. Aus Konsistenzgründen der Systemgrenzen im sektorenübergreifenden Vergleich dürften diese Aufwendungen nicht einbezogen werden. Diese werden im Rahmen dieses Abschlussberichts gesondert dargestellt.

Die Berechnungen der orientierenden Stoffstromanalyse beziehen sich demnach fokussierend auf die immobilen Bestandteile der Infrastruktur (Errichtung, Instandhaltung, Reparatur, Betrieb, Entsorgung) und deren Energieverbräuche. Die auf den mobilen Bestandteilen der Infrastrukturen stattfindende Dienstleistung, z. B. der Straßenverkehr mit den entsprechenden Kraftstoffverbräuchen, ist nicht Teil der Systemgrenzen. Aufgrund der hohen Relevanz werden die Veränderungen des Energieverbrauchs im Straßenverkehr abgeschätzt und als Exkurs dargestellt (vgl. Teil C). Besonders bei den Wirkungskategorien KRA, KEA und THG kann es zu Fehlinterpretationen führen, wenn nur die Berechnungen für die Errichtung, Instandhaltung und Reparatur zugrunde gelegt werden, ohne die möglichen Einsparpotenziale im Betrieb und durch die Nutzung mit zu betrachten.

Da die Nutzung der Infrastrukturen explizit nicht Bestandteil des Betrachtungsrahmens der Studie ist, werden die besonders relevanten Prozesse (Nettoenergieerzeugung der fossilen Kraftwerke und Energiebedarf des Verkehrssektors) ebenso berechnet und bei den Gesamtdarstellungen ausgewiesen. Dies geschieht in Exkursen für den Verkehrssektor und für die Kraftwerke bei der Gegenüberstellung der Energieaufwendungen.

Bezüglich der Systemgrenzen (vgl. Teil A, Kapitel 2.2) ist hervorzuheben, dass im Straßenverkehr lediglich die öffentliche Infrastruktur betrachtet wurde, private, z. B. Garagen, sind in den Ergebnissen nicht berücksichtigt. Weiterhin sind die Fahrzeuge nicht Untersuchungsgegenstand. Im Bereich der Wasserver- und Abwasserentsorgung wurde ebenfalls die öffentliche Infrastruktur (Netze und Anlagen) betrachtet (zusätzlich private Hausanschlusskanäle, nicht jedoch die privaten Hausinstallationen).

Die orientierende Stoffstromanalyse wurde zunächst für den Infrastrukturbestand Deutschlands für das Jahr 2012 durchgeführt. Darüber hinaus wurden ein Referenzszenario und vier Fallstudien (Alternativszenarien) mit den Stützjahren 2030 und 2050 erstellt, zwischen denen linear interpoliert wird. Je nach Annahmen in den verschiedenen Szenarien entwickeln sich die Infrastrukturbestände für die Jahre 2030 und 2050 in den einzelnen Sektoren und Teilsystemen unterschiedlich. Die Annahmen, die zugrunde gelegt wurden, werden in Teil C für die einzelnen Szenarien eingeführt.

Die Fortschreibung des Infrastrukturbestandes in die Jahre 2030 und 2050 geht prinzipiell von den theoretischen Nutzungsdauern der Infrastrukturen aus. Diese werden allerdings hinterfragt, und bei erkennbarem deutlichem Auseinanderfallen der theoretischen und der tatsächlichen Nutzungsdauer werden entsprechende Anpassungen im Modell vorgenommen. Darüber hinaus wird die Annahme getroffen, dass nicht mehr benötigte Infrastruktur zurückgebaut und nicht mehr instandgehalten wird. Sofern dies in der Praxis nur eingeschränkt erfolgt (z. B. im Rückbau alter Abwasserkanäle, Straßennetz), ist dies bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend zu berücksichtigen.

#### 2.2.1.3 Datenquellen

Einige der wichtigsten Referenzen zur Beschreibung der Infrastrukturteilsysteme (Mengengerüst, spezifische Materialmengen, Lebensdauern etc.) sind im Folgenden aufgeführt. Die genauen Literaturangaben sind im Quellenverzeichnis angegeben.

**Verkehr**

Mottschall/Bergmann (2013): Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland.

Mottschall/Bergmann (in Vorbereitung): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen und Wegebau.

Steger et al. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (Meilensteinbericht MaRess 2.3).

Spielmann et al. (2007): Life Cycle Inventories of Transport Services. Data v2.0, ecoinvent report No. 14.

VIZ 2011: Verkehr in Zahlen 2011.

Löchter (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum) (2009): Access-Datenbank zum Schienennetz der DB AG, persönliche Mitteilung vom 16.12.2009 (unveröffentlicht).

Google Maps, diverse Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichte.

**IKT**

Scharp (2011): Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk (Meilensteinbericht MaRess 2.3).

Borderstep (2010): Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz.

Borderstep (2014): Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbewerbssituation, im Auftrag des BITKOM – Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.

Telekom (2006): Geschäftsbericht 2006.

**Energieversorgung**

Statistisches Bundesamt (Destatis) (diverse)

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (diverse)

Bundesnetzagentur (diverse)

BDEW (diverse)

Steger et al. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (Meilensteinbericht MaRess 2.3).

Umweltbundesamt (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.

**Wasserver- und Abwasserentsorgung**

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserbeseitigung – Strukturdaten zur Wasserwirtschaft.

Steger et al. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen (Meilensteinbericht MaRess 2.3).

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014): Wasserwirtschaft in Deutschland.

ATT/BDEW/DBVW (2011): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011.

Mutschmann/Stimmelmayr (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung.

Die generischen Daten und Emissionsfaktoren wurden für die Berechnungen vom ifeu-Institut zur Verfügung gestellt und wurden auf Basis der Ökobilanzdatenbank EcoInvent hergeleitet.

### 2.2.2 Kostenabschätzung

Zur Bewertung der Fallstudien im Vergleich zum Referenzszenario werden neben der Material-, Energie- und Flächeninanspruchnahme insbesondere auch die Auswirkungen auf die Kosten der Infrastrukturbereitstellung und des Betriebs untersucht. Damit soll insbesondere geprüft werden, ob die in den Fallstudien skizzierten Gestaltungen der Infrastruktursysteme sich in einem insgesamt finanziell tragbaren Rahmen bewegen oder ob deren Finanzierung als unrealistisch einzuschätzen ist.

Im Folgenden werden die dabei gewählte methodische Herangehensweise sowie die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt.

#### 2.2.2.1 Grundansatz und Grenzen der Kostenabschätzung

Den Rahmen für die kostenseitige Beurteilung der Fallstudien bildet eine Abschätzung der Kostenentwicklung in den einzelnen Infrastruktursektoren in Abhängigkeit von verschiedenen Annahmen zum Mengen- und Wertgerüst der jeweiligen Infrastrukturkomponenten. Bei dieser wurde vom Infrastrukturbestand im Jahr 2012 ausgegangen. Dieser Bestand wurde entsprechend dem Referenzszenario bzw. den Fallstudien fortgeschrieben.

Durch den Vergleich der in den Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen entstehenden Kostenfolgen mit dem Referenzszenario wird in erster Linie untersucht, mit welchen Kostenentwicklungen bei den jeweiligen Fallstudien zu rechnen ist. Darüber hinaus kann die zu erwartende Kostenentwicklung eines von mehreren Kriterien bei der Schwerpunktsetzung zukünftiger Gestaltungsüberlegungen der Infrastruktursysteme sein.

Die Abschätzung der Kostenfolgen bei unterschiedlichen Entwicklungsszenarien ressourcenleichter Infrastrukturen kann nur stark vereinfacht und auf der Basis begründeter, aber nicht gesicherter Annahmen erfolgen. Aus diesem Grund ging es bei den Überlegungen nicht um die Prognose absoluter Kosten. Es handelt sich vielmehr um eine Durchschnittsbetrachtung. Die Kosten für Bau und Betrieb (einschl. Instandhaltung und Reparatur) einzelner Infrastrukturkomponenten können bei konkreten (Bau-)Maßnahmen stark von den zugrunde liegenden Kennwerten abweichen.

Der Informationsgehalt der Schätzungen ist dadurch vor allem auf eine begründete Darstellung der Entwicklungsrichtung beschränkt. Werden die Kosten durch die in der jeweiligen Fallstudie beschriebenen Maßnahmen gegenüber dem Referenzszenario stabil bleiben oder sinken? Oder ist unter Umständen mit einer steigenden Kostenbelastung zu rechnen?

Zur Beantwortung dieser und ähnlicher Fragen ist es ausreichend, wenn in die Kostenbetrachtung nur die Infrastrukturteilsektoren einbezogen werden, in denen im Rahmen der Fallstudie spezifische Veränderungen vorgesehen sind. Aus diesem Grund kann beispielsweise die gesamte Trinkwasserversorgungsinfrastruktur unberücksichtigt bleiben, da diese in den Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen gegenüber dem Referenzszenario keine Veränderungen erfährt.

#### 2.2.2.2 Methodik der Kostenabschätzung

Zur Analyse der jeweiligen Kostenfolgen verschiedener Infrastrukturkonfigurationen wurden der Werteverzehr des in den Infrastrukturen gebundenen Anlagevermögens in Form von Abschreibungen sowie die Kosten des Betriebs der Infrastrukturen berücksichtigt. Letztere umfassen die zur Bereitstellung der Infrastrukturen erforderlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten. Es wird unterstellt, dass es sich (auch) bei den Betriebskosten weitgehend um Fixkosten handelt. Eine differenzierte Berücksichtigung nutzungsabhängiger Kosten war bei der notwendigen Vereinfachung des Modells nicht möglich. Auf die Berücksichtigung von Finanzierungskosten mit Hilfe kalkulatorischer Zinsen konnte

verzichtet werden, da diese in ihrer Höhe vom gebundenen Kapital abhängen und damit die bereits durch die Abschreibungen aufgezeigte Entwicklungsrichtung lediglich verstärken würden.

Für die Ermittlung der Abschreibungen und Betriebskosten wurden vier unterschiedliche Infrastrukturkategorien betrachtet (vgl. Abbildung 15):

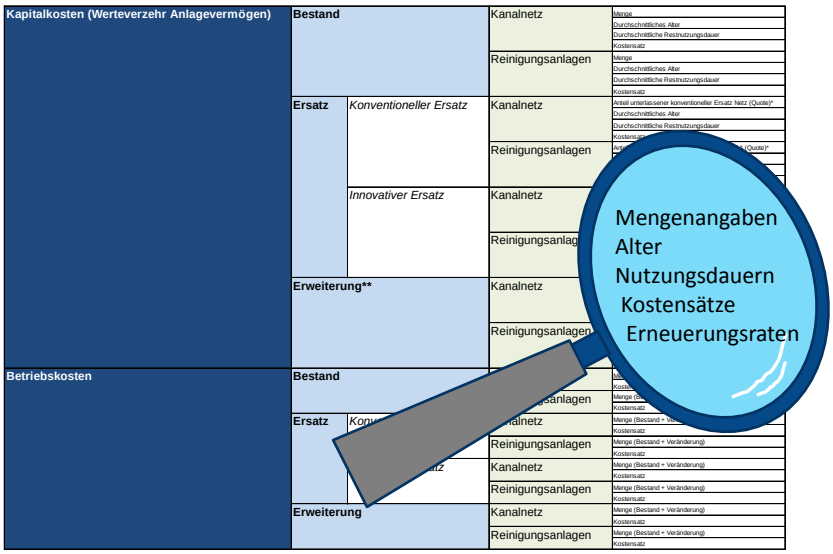
**Bestand:** Dabei handelt es sich um den bereits vorhandenen Infrastrukturbestand, der insbesondere mit seinem Wiederbeschaffungszeitwert im Jahr 2012 und der durchschnittlichen Restnutzungsdauer in die Betrachtung einfließt.

**Ersatz:** In der Regel werden Infrastrukturkomponenten am Ende ihrer technisch bedingten Nutzungsdauer weiter benötigt und deshalb ersetzt. Dieser Ersatz kann durch eine identische Konfiguration wie im Bestand erfolgen und hat dann im Modell bei stabilen Baupreisen keine kostenmäßigen Veränderungen zur Folge (konventioneller Ersatz). Der Ersatz kann jedoch auch durch Nutzung einer veränderten Technologie erfolgen (innovativer Ersatz). Durch Veränderungen beim Umfang der ersetzten Infrastrukturkomponenten und bei den anzuwendenden Kostenkennwerten kann sich ein Technologiewechsel auf die Kosten der Infrastruktur auswirken.

**Erweiterung:** Infrastruktur kann bei steigendem Bedarf ausgebaut werden. Das Anlagevermögen wird durch die mit diesen Erweiterungen der Infrastrukturkapazitäten verbundenen Investitionen erhöht. In der Folge entstehen zusätzliche Abschreibungen und Betriebskosten.

**Rückbau:** Bei sinkendem Bedarf kann auch der Rückbau von Infrastrukturkomponenten sinnvoll oder notwendig sein. Im verwendeten Modell wird dieser Aspekt vereinfachend durch das Unterlassen von Ersatzmaßnahmen abgebildet. Für die Zukunft wirkt sich dies dämpfend sowohl auf die Kapitalkosten als auch auf die Betriebskosten aus. Unter der Annahme, dass ausschließlich bereits abgeschriebene Infrastrukturkomponenten am Ende ihrer Nutzungsdauer zurückgebaut werden, bleiben Sonderabschreibungen unberücksichtigt. Einmalige Rückbaukosten werden ebenfalls nicht angesetzt. Es wird unterstellt, dass entsprechende Maßnahmen immer dann durchgeführt werden, wenn die Materialien benötigt werden oder die nicht mehr benötigte Anlage aufgrund von Neubaumaßnahmen beseitigt wird.

Abbildung 15: Methodik Kostenbetrachtung – Beispiel Abwasser




* z.B. bei geplanter Reduzierung der Kapazitäten
** Rückbau wird durch nur teilweisen Ersatz berücksichtigt. Kosten werden dafür vereinfachend keine angesetzt.

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Darüber hinaus wurde eine Reihe weiterer Annahmen getroffen, um eine Schätzung der Kosten der Infrastruktur möglich zu machen:

- Investiert wird immer frühestens dann, wenn eine vorhandene Anlage das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht hat. Die Anlage ist zu diesem Zeitpunkt abgeschrieben.
- Ersatzinvestitionen führen dazu, dass die Abschreibungen im bisherigen Umfang weiter anfallen. Veränderte Technologien und deren Herstellungskosten sowie veränderte Preise für die Anschaffung oder Herstellung von Infrastrukturkomponenten können jedoch berücksichtigt werden.
- Ersatzinvestitionen werden regelmäßig durchgeführt, es entsteht kein Investitionsstau.
- Rückbau reduziert im zugrunde liegenden Modell die Abschreibungen nicht, da nur bereits abgeschriebene Anlagen zurückgebaut werden.
- Abbruch-/Rückbaukosten entstehen nicht, da entsprechende Maßnahmen immer dann durchgeführt werden, wenn die Materialien benötigt werden oder die nicht mehr benötigte Anlage aufgrund von Neubaumaßnahmen beseitigt wird.
- Der Rückbau von Infrastrukturkapazitäten wird dadurch abgebildet, dass aufgrund der angenommenen Lebensdauer eigentlich notwendiger Ersatz teilweise unterlassen wird.
- Betriebskosten richten sich nach den betriebenen Kapazitäten und werden anhand geeigneter Parameter ermittelt (z. B. Netzlänge, Ausbaugröße, angeschlossene Nutzer).

### 2.2.3 Qualitative Ansätze zur Konzeption und Einschätzung der Fallstudien

Der quantitative Vergleich der Szenarien mittels der orientierenden Stoffstromanalyse und die Kostenabschätzung werden im Projekt RELIS durch qualitative Ansätze ergänzt. Die systemische Perspektive erfordert in Systematik und Methodik eine interdisziplinäre Bearbeitung, die eine gegenseitige Überprüfung ermöglicht, aber auch Anregungen schafft. Eine im Rahmen von RELIS eingesetzte qualitative Methode ist die SWOT-Analyse, mittels der die vier Fallstudien maßgeblich konzeptionell entwickelt wurden. Des Weiteren wurden qualitative Kriterien operationalisiert, anhand derer die Fallstudien jenseits ihrer quantifizierbaren Charakteristika auf ihre Wirkzusammenhänge und Eigenschaften hin geprüft werden können.

#### 2.2.3.1 Qualitative Kriterien zur Bewertung der Fallstudien

Für vertiefende Untersuchungen der Fallstudien wurden die folgenden fünf qualitativen Kriterien herangezogen: gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe von Bürgerinnen und Bürgern, Flexibilität, Reversibilität und Resilienz. In diesen fünf Kriterien bilden sich insbesondere die vom Umweltbundesamt gesetzten Systemeigenschaften ab. Denn die Infrastruktursysteme im Jahr 2050 sollen nicht nur „ressourcenleicht“ und „zukunftsfähig“ sein, sondern zudem „umweltschonend“, „demografiefest“ und „robust“ (vgl. Vorhabentitel).

Durch vertiefende Untersuchungen wurde gewährleistet, dass die aus den Analysen der Fallstudien abgeleiteten Handlungsempfehlungen nicht allein auf quantitativen Ergebnissen der Stoffstromanalyse gründen, sondern ausgehend von der Definition von Infrastrukturen als sozio-technische Systeme systemisch begründet sind.

Praktisch wurde in der Bearbeitung des Vorhabens folgendermaßen verfahren: Die qualitative Einschätzung der Fallstudien wurde zunächst vom Bearbeiterteam vorgenommen. Jeder Mitarbeiter im Team traf zunächst für sich individuell eine Einschätzung bzgl. der einzelnen Kriterien. Dazu diente eine einfache Skala von 0 („gar nicht förderlich“) bis 4 („voll und ganz förderlich“), die auf die einzelnen Kriterien für jede Fallstudie angewendet wurde. In Anlehnung an das Vorgehen in einem Delphi-

Verfahren wurden die einzelnen individuellen Werte zusammengetragen und visualisiert. In einer Workshopdiskussion erläuterte jeder Bearbeiter die Argumente für seine Bewertung. Insbesondere die Teilnehmer mit stark vom Mittel der Gruppe abweichenden Einschätzungen waren gefordert, ihre Gründe einzutragen. Aus den Diskussionen wurden die zentralen Argumente gesammelt und dokumentiert. Auf die so gesammelten Argumente wird in der Darstellung der Fallstudien Bezug genommen. Nach der gemeinsamen Diskussion einigte sich das Bearbeiterteam dann auf eine gemeinsam getragene Einschätzung (Wert), der z. T. vom ersten aus den individuellen Werten gebildeten Mittelwert abweicht.

Die fünf qualitativen Kriterien sind wie folgt definiert bzw. voneinander abgegrenzt:

#### Gesellschaftliche Akzeptanz

Weitreichende Veränderungsprozesse hinsichtlich der Infrastruktur müssen von einem breiten gesellschaftlichen Konsens getragen werden. Die gesellschaftliche Akzeptanz von Infrastrukturen und deren Umbau wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst: u.a. durch die Qualität und Kosten von Infrastrukturen und Infrastrukturdienstleistungen, das Design und die Nutzerfreundlichkeit sowie den Komfort der Infrastrukturen und ihrer Dienstleistungen, intuitive „Benutzeroberflächen“ (z. B. für die Anwendung multimodaler Verkehrsangebote) und Gewohnheiten. Gesellschaftliche Akzeptanz drückt sich somit mittelbar in der „Annahme“ von Dienstleistungen (Bsp. Mieterstrommodell) und alternativen technischen Gestaltungen von Komponenten (Niederdrucksystemtoiletten) aus sowie in der Nutzung von Apps (Carsharing) und sonstigen Produkten (etwa Betriebswasser).

„Gesellschaftliche Akzeptanz“ kann sich aber auch in Form von Zustimmung oder Ablehnung grundlegender strategischer Maßnahmen oder politischer Programme ausdrücken. Beispiele hierfür sind die Debatten zu dem Übertragungsnetzausbau oder dem Bau von Windkraftanlagen.

Es werden die in den Fallstudien ausgearbeiteten Maßnahmen hinsichtlich der Faktoren, die die Akzeptanz der Maßnahme potenziell beeinflussen können, bewertet. Außerdem wird die Eischätzung durch die Berücksichtigung der Indikatoren wie Konsumverhalten bzw. anhand von öffentlichen Debatten rückgekoppelt. Somit ist der Begriff der Akzeptanz hier auch als „öffentliche Einstellung“ zu charakterisieren.

#### Teilhabe

Teilhabe von Bürgerinnen und Bürgern in Bezug auf Infrastrukturen ist insbesondere in den Phasen von Planung und Betrieb der Infrastrukturen relevant. Teilhabe kann dabei unterschiedliche Modalitäten annehmen: z. B. Information, Beteiligung, Mitwirkung, Finanzierung, Eigentümer/Gesellschafter von Infrastrukturbetreibern. Teilhabe operationalisiert, inwiefern Bürger Einfluss haben können auf Entscheidungen bei Planung und Betrieb von Infrastrukturen. Das Kriterium wird damit eher im politischen Sinne von Teilhabe verstanden (Bürger) als im Hinblick auf den einfachen Zugang und die einfache Nutzung von Infrastrukturdienstleistungen (Kunden-Perspektive). Teilhabe wird durch Freiwilligkeit bzw. Wahlmöglichkeiten charakterisiert. Somit orientiert sich die Definition des Kriteriums der „Teilhabe“ eng an der rechtlichen Definition von Teilhabe – als Recht des Bürgers, an Verwaltungsentscheidungen zu partizipieren.

#### Flexibilität

Unter Flexibilität wird die Anpassungsfähigkeit eines Systems an veränderte Rahmen- und Umweltbedingungen verstanden. Hemmnisse für eine hohe Flexibilität sind z. B. lange Abschreibungszeiträume, Pfadabhängigkeiten oder fehlende Möglichkeiten, die Kapazitäten zu erhöhen. Das Kriterium operationalisiert die Anpassungsfähigkeit eines Systems. Ein flexibles System kann auf unterschiedliche Rah-

menbedingungen reagieren (vorsorgend; unterschiedliche Energieträger). Grundlegende Prinzipien sind hier „Polyvalenz“ und „multiple Nutzung“. (Bsp. Gaskraftwerk, das sowohl mit Erd- als auch mit Biogas betrieben werden kann; oder BHKW: das strom- oder wärmegeführt betrieben werden kann.)

**Reversibilität**

In enger Verbindung zur Flexibilität steht die Reversibilität von Infrastrukturen. Sie beschreibt primär deren Rückbaufähigkeit. Rückbau kann als eine spezifische Form der Anpassung/Flexibilität verstanden werden, bezieht sich jedoch im Gegensatz zur Flexibilität auf die Einstellung des Betriebs und den Umgang mit der Infrastruktur nach Beendigung seiner Funktionsfähigkeit.

Reversibilität kann aber auch in der Art definiert werden, dass sie auf die Folgen einer Infrastrukturmaßnahme, sowohl was ihren Bau als auch ihren Betrieb betrifft, Bezug nimmt. Hiermit ist dann nicht die Rückbaufähigkeit von Infrastrukturen erfasst, sondern vielmehr mögliche Umweltwirkungen von Emissionen, die beim Bau und beim Betrieb der Infrastrukturen produziert werden. Besonders reversibel bzw. nicht-irreversibel sind beispielsweise alle Formen von erneuerbaren Energien, wohingegen der Einsatz von fossilen Brennstoffen oder auch von Atomenergie Endprodukte hinterlässt, die als irreversibel bezeichnet werden müssen. Zugleich soll das Kriterium „Reversibilität“ auf diese Weise mögliche Folgen von Fehlfunktionen/Unfällen von Infrastrukturkomponenten operationalisieren.

**Resilienz**

Der Begriff Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Systems, bei Störungen (z. B. Überlastung, Unterauslastung, ungünstige Witterungsbedingungen, Unfälle, Katastrophen) den Zusammenbruch bzw. Ausfall abzuwenden und zeitnah in einen akzeptablen Zustand zurückzukehren. Es geht bei Resilienz von Infrastrukturen also um die Widerstandsfähigkeit, Fehlertoleranz und Fähigkeit zur (Selbst-)Regulation und Anpassung eines Systems zur Verringerung seiner Störanfälligkeit (vgl. Hahne 2016). Resilienz operiert auf technischer wie auf der Governance-Ebene. „Resilienz“ operationalisiert ähnlich der „Flexibilität“ die Reaktionsmöglichkeit eines Systems auf kurzfristige Bedarfsänderungen, ohne in kritische Bereiche seiner Funktionsfähigkeit zu kommen.

Es zeigt sich, dass zwischen den einzelnen Kriterien z. T. Überschneidungen, Interdependenzen, Rückkopplungen und z. T. Widersprüche (Zielkonflikte) bestehen können. Auf diese Aspekte wird in den vertiefenden Untersuchungen der Fallstudien in Teil C zu achten sein.

#### 2.2.3.2 SWOT-Analyse als Methode zur Exploration und Entwicklung der Fallstudien

Für die vier im Vorhaben betrachteten technischen Infrastruktursysteme sollten sektorenübergreifende Fallstudien entwickelt werden. Um möglichst aussagekräftige Fallbeispiele zu entwickeln, wurden mit Hilfe einer SWOT-Analyse („Strengths and Weaknesses“ sowie „Opportunities and Threats“) geeignete strategische Ansatzpunkte einer ressourcenleichten Infrastrukturgestaltung herausgearbeitet. Bei der SWOT-Analyse handelt es sich um ein aus der Betriebswirtschaftslehre übernommenes Verfahren der strategischen (Unternehmens-)Planung. Es dient dazu, verschiedene Handlungsoptionen vor dem Hintergrund einer spezifischen Fragestellung zu beleuchten und eine Priorisierung zu ermöglichen. Das Verfahren erlaubt dabei sowohl die Berücksichtigung „harter Fakten“ als auch eher weicher, subjektiver Einschätzungen und Bewertungen. Eine mit mehreren Teilnehmern durchgeführte SWOT-Analyse ist immer auch ein Diskurs und ein Aushandlungsprozess, der je nach Zielstellung und Ausgestaltung zu sehr konkreten Ergebnissen oder zu eher richtungweisenden Grundprämissen führen kann.

*Ziel der SWOT-Analyse im Rahmen von RELIS* war die Identifizierung besonders ressourcenrelevanter Infrastrukturbestandteile (Teilsysteme/-komponenten) in Kombination mit relevanten Verände-

rungsprozessen und Handlungsoptionen. Für die Infrastruktursysteme sollten damit strategische Handlungsoptionen abgeleitet werden, die eine Schwerpunktsetzung bei den zu betrachtenden technischen und organisatorischen Ansätzen ermöglichen würden. Darüber hinaus sollte die SWOT-Analyse Aussagen zu möglichen Handlungsstrategien liefern, die die spezifischen Bedingungen der Infrastrukturen berücksichtigen.

Eine Analyse zur Identifikation von Ansatzpunkten für eine Umgestaltung hin zu ressourcenleichten Infrastrukturen erfordert eine differenzierte Betrachtung der vier Infrastruktursektoren. Da die Ebene der vier Sektoren bzw. Infrastruktursysteme Energie, Verkehr, Wasser und IKT zu umfangreich und komplex ist und auch die einzelnen Teilsysteme untereinander zu heterogen sind, wird die Analyse auf Ebene der zuvor abgegrenzten zehn Infrastrukturteilsysteme durchgeführt. Durch die Ausdifferenzierung in Teilsysteme vergrößert sich zwar die Anzahl der Untersuchungsgegenstände für die SWOT-Analysen, allerdings werden die Aussagen weniger abstrakt. Dadurch können auch die Recherche nach relevanten Optionen zur Reduktion des Ressourceneinsatzes zielgerichteter erfolgen und eine Vorauswahl getroffen werden. Denn schließlich gibt es in jedem Teilsektor spezifische Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme.

**Wesentliche Schritte der SWOT-Analysen im Rahmen des Vorhabens RELIS im Überblick**

Tabelle 1: Teilschritte der SWOT-Analyse und Bearbeitungsgrundlagen

| Teilschritte | | Grundlagen |
|---|---|---|
| 1. Abgrenzung der Teilsysteme | | Systemgrenzen |
| SWOT-Analyse im engeren Sinne | 2. Inweltanalyse (Stärken/Schwächen) | Ausgehend von einer Beschreibung der wesentlichen Merkmale des Infrastrukturteilsystems (endogene Faktoren), Identifikation von Stärken und Schwächen |
| | 3. Umweltanalyse (Chancen/Risiken) | Ausgehend von einer Beschreibung der relevanten Rahmenbedingungen und Trends für das Teilsystem (exogene Faktoren), Identifikation von Chancen und Risiken |
| | 4. Einordnung in SWOT-Matrix | Klassifizierung von Stärken/Schwächen und Chancen/Risiken in Bezug auf die Zielkategorien für das Teilsystem |
| | 5. Identifizierung strategischer Ansatzpunkte | SWOT-Matrix für das Teilsystem |
| 6. Identifizierung der Bezüge zu anderen Teilsystemen | | Systemgrenzen und Zusammenstellung der strategischen Ansatzpunkte aller Teilsysteme |
| 7. Bündelung zu Handlungsstrategien als Grundlage der Fallstudien | | |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Im Rahmen der Inwelt- und Umweltanalyse wurden vom interdisziplinären Bearbeiterteam gemeinsam technische und institutionelle Merkmale der Infrastrukturteilsysteme gesammelt und als Stärken, Schwächen, Chancen oder Risiken eingeordnet. Basis bildeten Literaturrecherchen und die sektorenspezifischen Kenntnisse, die in umfangreichen Systematisierungen und Analysen der Teilsysteme (Bestandsaufnahme der technischen Komponenten, Bedarfe, Veränderungsprozesse und Zukunftstrends, Anpassungsoptionen) mündeten und die in verbalen Kurzbeschreibungen der Infrastruktursysteme in Form interner Arbeitsdokumente verdichtet wurden. Es ist vollkommen klar, dass die im Rahmen der SWOT-Analyse verarbeiteten Argumente nur eine Auswahl der nach Einschätzung der Bearbeiter zentralen Argumente darstellen können, um die Komplexität der weiteren Arbeiten auf ein handhabbares und zugleich angemessenes Niveau zu reduzieren. Diese Sammlung an Argumenten wurde an-

schließend in die Struktur einer SWOT-Matrix überführt. In der Abbildung 16 dargestellt ist beispielhaft die SWOT-Matrix für das Infrastrukturteilsystem der Wasserversorgung.

Abbildung 16: SWOT Wasserversorgung

| Wasserversorgung | | Stärken | | | | | | | | | | | | | | | Schwächen | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Institutionell | | | | | Finanziell | | Technisch | | | | | | | | Institutionell | | | | Finanziell | | | Technisch | | | |
| | Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem in der bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung? | kommunale Selbstverwaltungsaufgabe | lokale Steuerung und Entscheidung zur Gestaltung des Systems (lokal angepasst) | funktionierende staatliche Aufsicht | hohe Akzeptanz in Bevölkerung | hohe Anforderungen an Trinkwasserqualität | Vollkostendeckungsprinzip | lange Abschreibungszeiträume | hohe Anschlussgrade | lokal und regional autonome Infrastrukturysteme | Vergleichsweise geringer KRA und KEA für Emeuerungsmaßnahmen | geringe Flächeninanspruchnahme für Infrastrukturen und Vorsorgecharakter für TW-Schutzflächen | hohe Qualität der Versorgungsinfrastrukturen (geringe Verlustrate und Einhalten der TW-Qualitäten) | Hohe Lebensdauer der Anlagen und Netze | Kopplungen mit anderen Sektoren (insbesondere Energie) | keine problmeatischen Materialien | keine abgestimmten, nationalen Planungen | kein Wettbewerb | institutionelle und rechtliche Komplexität und Zersplitterung | kleinteilige (Unternehmens-)Struktur | Tarifsystem korrespondiert nicht mit hohem Fixkostenanteil | lange Abschreibungszeiträume | sunk costs | Systemfremde Leistungen werden erbracht (Löschwasserbereithaltung, Grundwasserregulierung) | hohe Pfadabhängigkeiten | technische Innovationen setzen sich kaum durch | begrenzte Flexibilität bei der kurzfristigen Anpasung |
| Chancen | Energiefrage (Nutzung der Energiepotenziale) gerät in den Fokus der Wasserversorgung (Beitrag zur Energiewende) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Augenmerk auf Ressourceneffizienz und Stoffströme | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Verbreitete Diskurse Nachhaltiger Entwicklung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Demografischer Wandel (schrumpfung) bedingt sinkende Wasserabgabe | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | sinkende Wasserentnahmen in der Industrie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Risiken | Klimawandelauswirkung schlagen unmittelbar auf Wasserdargebot und -nachfrage durch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Siedlungsstrukturelle Trends führen zu weiterer "Entdichtung" der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Haushaltskrise der Kommunen (Schuldenbremse) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | TTIP, CETA verändern institutionelle Grundlagen der Wasserversorgung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Nitratbelastung und anthropogene Spurenstoffe im Rohwasser | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

In einem folgenden Schritt wurden von den Bearbeitern in interdisziplinären Teams Bezüge zwischen den Stärken und Schwächen auf der einen und den Chancen und Risiken auf der anderen Seite vermerkt. Dabei wird nicht jeder einzelne Bezug zwischen einer konkreten z. B. Stärke und Chance im Detail vertiefend, d. h. im Sinne von qualitativen Wirkungsbeziehungen in diesem konkreten Punkt, diskutiert. Wichtig ist zunächst festzustellen, dass sich ein Bezug zwischen den Punkten herstellen lässt.

Es ergibt sich damit eine Matrix (Abbildung 17), für die in den Spalten und Zeilen die Häufigkeit der Nennungen (Relationen) abgebildet werden kann.

Abbildung 17: Konsolidierte SWOT-Matrix Wasserversorgung

| Wasserversorgung | | Stärken | | | | | | | | | | | | | | | Schwächen | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Institutionell | | | | | Finanziell | | Technisch | | | | | | | | Institutionell | | | | Finanziell | | | Technisch | | | |
| | Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem in der bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung? | kommunale Selbstverwaltungsaufgabe | lokale Steuerung und Entscheidung zur Gestaltung des Systems (lokal angepasst) | funktionierende staatliche Aufsicht | hohe Akzeptanz in Bevölkerung | hohe Anforderungen an Trinkwasserqualität | Vollkostendeckungsprinzip | lange Abschreibungszeiträume | hohe Anschlussgrade | lokal und regional autonome Infrastruktursysteme | Vergleichsweise geringer KRA und KEA für Erneuerungsmaßnahmen | geringe Flächeninanspruchnahme für Infrastrukturen und Vorsorgemaßnahmen für TW-Schutzflächen | hohe Qualität der Versorgungsinfrastrukturen (geringe Verlustrate und Einhalten der TW-Qualitäten) | Hohe Lebensdauer der Anlagen und Netze | Kopplungen mit anderen Sektoren (insbesondere Energie) | keine problematischen Materialien | keine abgestimmten, nationalen Planungen | kein Wettbewerb | institutionelle und rechtliche Komplexität und Zersplitterung | kleinteilige (Unternehmens-)Struktur | Tarifsystem korrespondiert nicht mit hohem Fixkostenanteil | lange Abschreibungszeiträume | sunk costs | Systemfremde Leistungen werden erbracht (Löschwasserbereitstellung, Grundwasserregulierung) | hohe Pfadabhängigkeiten | technische Innovationen setzen sich kaum durch | begrenzte Flexibilität bei der kurzfristigen Anpasung |
| Chancen | Energiefrage (Nutzung der Energiepotenziale) gerät in den Fokus der Wasserversorgung (Beitrag zur Energiewende) | x | x | | | | x | | | | x | | | | x | | x | x | x | x | | | | | x | x | |
| | Augenmerk auf Ressourceneffizienz und Stoffströme | x | x | | x | | | x | | x | x | | x | x | x | | | | | | | x | | | x | x | |
| | Verbreitete Diskurse Nachhaltiger Entwicklung | | x | | x | x | | x | | | | x | x | x | | x | | | | | | x | | x | | | |
| | Demografischer Wandel (schrumpfung) bedingt sinkende Wasserabgabe | | x | | | | x | | x | x | | | | | | | | | | | x | | x | | x | x | x |
| | sinkende Wasserentnahmen in der Industrie | | | x | | | | | | x | | | | | x | | x | | x | | | | | | | x | |
| Risiken | Klimawandelauswirkung schlagen unmittelbar auf Wasserdargebot und -nachfrage durch | | x | | x | | | | | x | | x | x | | x | | x | | | | | | | x | x | x | x |
| | Siedlungsstrukturelle Trends führen zu weiterer "Entdichtung" der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich) | x | x | | | | x | | x | x | | | | | | | | | | | x | | x | | x | x | x |
| | Haushaltskrise der Kommunen (Schuldenbremse) | x | x | x | x | | x | x | | | | | x | x | | | x | | x | x | x | x | x | | | | |
| | TTIP, CETA verändern institutionelle Grundlagen der Wasserversorgung | x | | x | x | | x | x | | | | | x | x | x | | | x | x | x | | x | x | | | | |
| | Nitratbelastung und anthropogene Spurenstoffe im Rohwasser | | | x | | x | | | | x | | x | x | | | | | | | | | | | | | x | |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die Faktoren (SWOT) mit den meisten identifizierten wechselseitigen Bezügen sind von besonderer strategischer Relevanz für das Infrastruktursystem bzw. dessen Entwicklung. Sie sind in Abbildung 17 gelb hervorgehoben. Diese Gewichtung der Faktoren bildet eine Grundlage für die weitere diskursive Sondierung und Konkretisierung der Fallstudien.

Zur Strategieentwicklung auf Basis einer SWOT werden dann Stärken und Schwächen jeweils mit den Chancen und Risiken in Bezug gesetzt. So ergeben sich vier Perspektiven für strategische Ansatzpunkte:

1. Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Chancen im Sinne von „Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen“;
2. strategische Ansatzpunkte für Stärken – Risiken im Sinne von „Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden“;
3. strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen im Sinne von „Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen“;
4. strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Risiken im Sinne von „Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen“.

Diese vier Perspektiven werden systematisch für die zehn Infrastrukturteilsysteme aufgegriffen und mit strategischen Ansatzpunkten hinterlegt (vgl. Teil B, Kapitel 3). Da sich strategische Ansatzpunkte in der Regel nicht aus nur einer Beziehung zwischen zwei Einzelargumenten ableiten lassen, wurden verschiedene Bezüge und die als von besonderer strategischer Relevanz identifizierten Faktoren integriert betrachtet und kognitiv verknüpft.

# Teil B: Infrastruktursysteme – Analyse von Veränderungsprozessen, Zukunftstrends und Anpassungsoptionen der Infrastrukturen

In Teil A Kapitel 1.2 sind die Systemgrenzen der insgesamt zehn Infrastrukturteilsysteme, die Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen von RELIS sind, primär in Funktion auf die orientierende Stoffstromanalyse definiert. Zur weiteren Auseinandersetzung mit den Infrastrukturen und der Suche nach Optionen und Ansatzpunkten für ressourcenleichte Infrastrukturgestaltungen ist eine vertiefte Auseinandersetzung mit den technischen und institutionellen Merkmalen der Systeme sowie ihrer Rahmenbedingungen erforderlich. Dazu werden in diesem Kapitel zunächst wesentliche externe Veränderungsprozesse der Rahmenbedingungen und Zukunftstrends, die Auswirkungen auf die Infrastrukturbereiche haben, dargestellt. Die Systematisierung dieser Veränderungsprozesse und Zukunftstrends ist wichtig, um zukünftige Herausforderungen, Handlungsdruck und Rahmenbedingungen für die Infrastrukturgestaltung abschätzen zu können.

Eine kurze Darlegung der rechtlichen Anforderungen an Infrastrukturen im Rahmen der Daseinsvorsorge spannt den normativ-gesellschaftspolitischen Rahmen der weiteren Überlegungen. Neben den sektorenübergreifenden existiert eine Reihe sektorenspezifischer Veränderungsprozesse und Zukunftstrends, die in den darauf folgenden Kapiteln für die einzelnen Sektoren systematisiert werden. Die wesentlichen Merkmale und Auswirkungen der Veränderungsprozesse und Zukunftstrends in den jeweiligen Infrastrukturbereichen werden auf Basis einer Literaturrecherche erarbeitet, ebenso grundlegende Optionen zur Anpassung und Umgestaltung der jeweiligen Infrastrukturen.

Aufbauend auf diesen sektorenspezifischen Systematisierungen der Merkmale, Rahmenbedingungen und Trends werden die zentralen Ergebnisse der SWOT-Analysen vorgestellt. Diese dienen wiederum der Identifikation und Auswahl von strategischen Ansatzpunkten einer ressourcenleichten Infrastrukturgestaltung. Die strategischen Ansatzpunkte werden in den vier Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen in Teil C zu möglichen Szenarien zusammengesetzt und modelliert.

## 1 Allgemeine, Infrastruktursektoren übergreifende Veränderungsprozesse der Rahmenbedingungen und Zukunftstrends

Die folgenden generischen, d. h. sektorenübergreifenden, Veränderungsprozesse und Trends können sich „positiv“, „negativ“ oder „nicht eindeutig zu bestimmend“ auf die Ressourceninanspruchnahme in den einzelnen Infrastruktursystemen auswirken. Einzelne dieser Veränderungsprozesse und Trends sind durch den Gesetzgeber und weitere Stakeholder allerdings nicht oder nur begrenzt beeinflussbar. Sie bilden somit den (exogen) gegebenen Rahmen für die Handlungs- und Gestaltungsoptionen im Hinblick auf ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen. Sowohl auf technisch-ökonomischer (Pfadabhängigkeiten) als auch institutioneller Ebene können sie sowohl hemmende bzw. retardierende als auch befördernde Momente für eine Anpassung, Weiterentwicklung oder Umgestaltung der Infrastrukturen enthalten. Veränderte Rahmenbedingungen legen Veränderungen der bestehenden Infrastrukturen nahe. Wenn Notwendigkeiten der Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen erkannt und von den zentralen Akteuren prinzipiell geteilt werden, bieten sich Gelegenheiten für deren Weiterentwicklung und Umgestaltung. Dabei sind technologische, ökonomische und soziale Veränderungsprozesse und Trends zu differenzieren.

Zu den für technische Infrastruktursysteme maßgeblichen **Veränderungsprozessen** („Megatrends“) gehören insbesondere (vgl. u.a. Libbe/Köhler/Beckmann 2010):

- **Demografischer Wandel**, nicht nur verstanden als „weniger, älter, bunter“ werdende Bevölkerung, sondern auch als Gleichzeitigkeit und räumlich eng beieinander liegende Prozesse von Wachstum und Schrumpfung von Einwohnerzahlen. Dies führt zu teilweise erheblichen Aus-

wirkungen auf die Auslastungen von Infrastrukturen und Netzen (z. T. kleinräumlich stark differenziert).

- **Verknappung fossiler Brennstoffe** sowie teilweise abnehmende Ressourcenverfügbarkeit und daraus folgende Preissteigerungen für Rohstoffe[14] mit möglichen Auswirkungen auf die Kosten der Erzeugung z. B. von Energie/Trinkwasser und der Bereitstellung/des Baus von Infrastrukturen (seltene Rohstoffe in Komponenten und Anlagenteilen).
- **Klimawandel** und Maßnahmen zum Klimaschutz (u.a. Ausbau regenerativer Energien, energetische Sanierung etc.) und zur -anpassung (z. B. Wasserressourcenmanagement, Klimaresilienz-Maßnahmen).
- **Technologischer Wandel**, schnellere Innovations- und Produktzyklen, Digitalisierung.
- **Strukturwandel** (z. B. wirtschaftliche Strukturbrüche, zunehmender globaler Wettbewerb, Versorgungsengpässe).
- **Siedlungsstruktureller Wandel** und zunehmende räumliche Disparitäten zwischen prosperierenden und strukturschwachen Regionen bedingen eine „Entdichtung" von Infrastrukturnetzen und deren Auslastung. Direkt betroffen ist davon oftmals die Finanzierung der Infrastrukturen auch vor dem Hintergrund der Prinzipien der Daseinsvorsorge (Erreichbarkeit, Verfügbarkeit, Erschwinglichkeit etc.).
- In einigen Kommunen und Regionen reduzierte bzw. sich zukünftig weiter **einengende finanzielle Handlungsspielräume** treffen auf hohe Investitionsbedarfe und Infrastrukturfolgekosten. Die Schere bei der Infrastrukturausstattung und -qualität zwischen relativ wohlhabenden und wirtschaftlich stagnierenden Städten/Regionen öffnet sich weiter.
- **Gesellschaftlicher Wandel und Wertewandel**, Individualisierung und Ausdifferenzierung der Sozialstruktur führen zu diversifizierten Strukturen der Nachfrage nach Infrastruktur-Dienstleistungen.

Absehbare bzw. bereits eingeläutete **Zukunftstrends**, die sich über verschiedene Infrastruktursektoren hinweg identifizieren lassen:

- Neuartige bzw. sich vertiefende Kopplungen zwischen verschiedenen Infrastrukturbereichen/-sektoren („Sektorkopplung"): Energie – Verkehr (insbesondere Elektromobilität), IKT – Energie (z. B. Smart Metering, intelligentes Lastmanagement), Abwasser – Energie (z. B. Klärgasgewinnung Wärmerückgewinnung, , Phosphorrückgewinnung), Wasser – Abwasser („Denken" in Wasserkreisläufen, Integriertes Wasserressourcenmanagement) etc.
- Sensibilität für Umgang mit Unsicherheiten in der Planung von langlebigen, technischen Infrastruktursystemen vor dem Hintergrund von sich z. T. kontinuierlich wandelnden Rahmenbedingungen und technologischen Möglichkeiten (Prognoseunsicherheiten).
- Sensibilität und Augenmerk für das Thema Kritikalität, Vulnerabilität und Resilienz von (kritischen) Infrastrukturen (BMI 2009) vor dem Hintergrund neuer Bedrohungen komplexer Infrastruktursysteme wie etwa durch äußere Einwirkungen, einschließlich Klimawandel, terroristische und Cyber-Angriffe.
- Veränderte Anforderungen an bzw. Prinzipien für die Gestaltung von Infrastruktursystemen wie etwa Ressourceneffizienz, Flexibilität, Adaptionsfähigkeit und Resilienz (vgl. Kluge/Libbe 2006, Libbe/Petschow 2015).

14 Neuere Entwicklung zeigen, dass durch die Anwendung neuer (zum Teil höchst umstrittener) Fördertechniken wie etwa Fracking die Energiepreise durch das Erschließen neuer Quellen durchaus (vorübergehend) gesenkt werden können.

# 2 Rechtliche Anforderungen an Infrastrukturen im Rahmen der Daseinsvorsorge

Die folgende Zusammenstellung kann nur kursorisch sein und einen grundsätzlichen Rahmen aufspannen. Gleichwohl ist eine wenn auch kurze Auseinandersetzung mit den rechtlichen Anforderungen zur Ausgestaltung der Daseinsvorsorge insbesondere deshalb interessant, da sich die zu entwickelnden Strategien und Optionen im übergeordneten Werte- und Rechtsrahmen einfügen müssen. In der Gestaltung der Governance von Infrastruktursystemen der Daseinsvorsorge kommen Vorstellungen des Verhältnisses von Staat und Bürger bzw. öffentlicher Hand, Wirtschaft und Gesellschaft zum Ausdruck. Optionen, die grundlegende ordnungspolitische und gesellschaftlich geteilte Vorstellungen zur Gestaltung der Daseinsvorsorge und z. B. ihrer Qualitäten und Kosten infrage stellen, werden nur bedingt umsetzbar sein.

Bereiche technischer und sozialer Infrastrukturen beziehungsweise die mit diesen verbundenen Leistungen werden in Deutschland zu einem großen Teil als (kommunale) **Daseinsvorsorge** (Forsthoff 1938 und 1958) und nach EU-Recht als **Dienstleistungen von allgemeinem (wirtschaftlichen) Interesse** (DAWI) deklariert (vgl. Europäische Kommission 2004, 2013). Ein wesentliches Merkmal von Daseinsvorsorge ist ihre Gemeinwohlorientierung. Dabei wird davon ausgegangen, dass ihre Bereitstellung in erster Linie der Versorgung der Bevölkerung und der Wirtschaft mit essentiellen und existenziellen Gütern und Dienstleistungen durch und für das Gemeinwesen dient. Infrastrukturen werden damit auch als Gemeinschaftsgut angesehen.

Verfassungsrechtlich lässt sich in Deutschland die Daseinsvorsorge in dem als Staatsziel ausgestalteten **Sozialstaatsprinzip** nach Art. 20 Abs. 1 des Grundgesetzes verorten. Die spezifisch kommunale Daseinsvorsorge ist in den Gemeindeordnungen der Bundesländer konkretisiert. Daseinsvorsorge umfasst dabei Tätigkeiten, die definitorisch sowohl wirtschaftlicher als auch nicht-wirtschaftlicher Art sein können[15]. Zu diesen Dienstleistungsbereichen zählen u.a. die Energieversorgung, die Wasserversorgung, die Abwasser- und Abfallentsorgung, Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsdienstleistungen. Dabei können diese Aufgaben je nach Gemeindeordnungen in den Ländern als freiwillige oder pflichtige Selbstverwaltungsaufgaben definiert sein (vgl. zur Typologie gemeindlicher Aufgaben Dreier (1998), Art 28 Rz. 84). Grundsätzlich wird die Bereitstellung von Leistungen der Daseinsvorsorge in Deutschland als Aufgabe der Kommunen gesehen und gelebt.

Eine weitere wichtige Rahmenbedingung zur Ausgestaltung der Daseinsvorsorge und damit der Infrastrukturen in den Sektoren Energie, Wasser, Verkehr und IKT ist das in Art. 28 Abs. 2 GG grundsätzlich verankerte Recht auf **kommunale Selbstverwaltung** und damit verbunden das Recht, frei die Art und Weise der Aufgabenwahrnehmung in Kommunen zu organisieren. Traditionell werden die Aufgaben der Daseinsvorsorge in den Städten, Gemeinden und Landkreisen mittels kommunaler Unternehmen erbracht.

Auf nationaler Ebene in Deutschland ist für die künftige Gestaltung von Infrastrukturen insbesondere mit Blick auf die Herausforderungen des demografischen Wandels und die Finanzierung von Infrastrukturen und Daseinsvorsorge die **Gleichwertigkeit der Lebensverhältnisse** ein weiteres wichtiges grundgesetzlich in Art. 72 Abs. 2 verankertes Ziel.

Auf europäischer Ebene sind zunächst Art. 14 des Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV) (Ex-Artikel 16 des EG-Vertrages) und Art. 106 Abs. 2 AEUV (Ex-Art. 86 Abs. 2 EGV) von besonderer Relevanz. Angesprochen sind dort „Dienstleistungen von allgemeinem wirtschaftlichen Interesse“, die, wenn auch für die Allgemeinheit erbracht, marktbezogene Tätigkeiten sind. Dies be-

15 Vgl. hierzu auch die in der EU eingeführte Unterscheidung von Dienstleistungen von allgemeinem wirtschaftlichen und nicht-wirtschaftlichen Interesse (vgl. Europäische Kommission 2013: 20).

deutet, dass gemeinwohlorientierte Dienstleistungen der Daseinsvorsorge, wenn mit ihrer Erbringung eine wirtschaftliche Tätigkeit vorliegt, nicht vom europäischen Wettbewerbsrecht und Vergaberecht ausgenommen sind. Damit wird in der europäischen Konzeption der Dienstleistungen von allgemeinem wirtschaftlichen Interesse (DAWI) die Sicherung der Gemeinwohlorientierung nicht zwangsläufig in einer öffentlich-rechtlichen (u.a. kommunalen) oder gemeinnützigen Trägerschaft gesehen. Die gemeinwohlrelevante Leistung kann sowohl von der öffentlichen Hand als auch privat unter öffentlicher Kontrolle (Gewährleistungsstaatsprinzip) übernommen werden.

Bei der Bestimmung von Gemeinwohlverpflichtungen unterscheidet die Europäische Kommission zwischen allgemeinen und besonderen Verpflichtungen. Zu den allgemeinen Verpflichtungen zählt sie Universaldienste, Kontinuität, Dienstegalität, Erschwinglichkeit sowie Nutzer- und Verbraucherschutz. Das Konzept der Universaldienste legt laut „Weißbuch der Europäischen Kommission zu Dienstleistungen von allgemeinem Interesse“ (Europäische Kommission 2004) fest, dass jedermann Anspruch auf bestimmte Dienste nach Kriterien wie flächendeckende Versorgung und Erschwinglichkeit hat[16]. Auf diese Weise soll abgesichert werden, dass auch bei einer Öffnung von Märkten (wie z. B. im Bereich der Telekommunikation oder des Stromsektors geschehen) eine flächendeckende Grundversorgung und damit das Gemeinwohl sichergestellt werden. Daneben existieren besondere Verpflichtungen, die nur in bestimmten Sektoren zum Tragen kommen. Hierzu zählt die Europäische Kommission allgemeine und technische Sicherheit, Versorgungssicherheit, Netzzugang und Zusammenschaltbarkeit sowie Medienpluralismus. Die Durchsetzung soll durch die Einrichtung einer öffentlichen Regulierungsinstanz, die regelmäßige Evaluation der Dienstleistungen und schließlich durch sektorspezifische Bewertungen und Regulierungsinitiativen erfolgen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Dienstleistungen von allgemeinem (wirtschaftlichen) Interesse in der Konzeption der Europäischen Union eine grundsätzliche ordnungspolitische Differenz zum deutschen Modell der Daseinsvorsorge aufweisen. Diese Differenz ist in der jüngeren Vergangenheit vielfach Gegenstand politischer Auseinandersetzungen gewesen.

In den in RELIS untersuchten Sektoren sind in den einzelnen Teilsystemen sehr unterschiedliche **Regime der Wettbewerbs- und Marktgestaltung** und damit einhergehend Formen und Strukturen der Leistungserbringung zu verzeichnen. Damit verknüpft sind unterschiedliche Möglichkeiten der Planung, Steuerung und Kontrolle der Infrastrukturentwicklung und Leistungserbringung. Grundsätzlich besteht entlang der Wertschöpfungskette innerhalb eines Sektors und zwischen den verschiedenen Sektoren der Daseinsvorsorge ein Nebeneinander von regulierten Formen des Wettbewerbs um den Markt und „reinen“ Wettbewerbsmärkten.

16 In Deutschland werden Leistungen der Daseinsvorsorge mit der Gewährleistung gleichberechtigten Zugangs aller Bürgerinnen und Bürger zu wichtigen Dienstleistungen und Einrichtungen, Versorgungssicherheit und Kontinuität der Dienstleistung verbunden.

Übersicht 1: Übersicht der Wettbewerbsformen/-intensitäten entlang der Wertschöpfungsketten in Sektoren der Daseinsvorsorge

| Wertschöpfungsstufe | Wasserversorgung[1] | Abwasserentsorgung[2] | Strom[3] | Gas | Wärme | Abfall | IKT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Erzeugung/ Gewinnung/ Beschaffung | Kein Wettbewerb; aber in geringem Maße Konkurrenz zu Eigenversorgern; denkbare Konkurrenzen zwischen aufbereitetem Brauchwasser und Trinkwasser | Kein Wettbewerb; Anschluss- und Benutzerzwang | Wettbewerb; Einspeisevorrang für Erneuerbare Energien ins Netz; Handel an der Strombörse | Wettbewerb | Kein Wettbewerb; aber Konkurrenz zwischen verschiedenen Wärmequellen | Kein Wettbewerb; Abfallandienungszwang; | Wettbewerb |
| Netze | Konzession | Konzession | Vergabewettbewerb Netzkonzession | Vergabewettbewerb Netzkonzession | Konzession | Vergabewettbewerb Gebietskonzession | Wettbewerb, z. T. konkurrierende Netze |
| Vertrieb | Kein Wettbewerb | Kein Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb zwischen Systemen | Kein Wettbewerb | Wettbewerb |
| Dienstleistungen | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb |
| Sonstiges | Benchmarking als Wettbewerbssubstitut | Benchmarking als Wettbewerbssubstitut | | | | | |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Für eine detaillierte Darstellung der durch eine Vielzahl staatlicher, d. h. gesetzlicher, und verbandlicher Regelungen und Normen regulierten Wasserwirtschaft in Deutschland siehe Tauchmann et al. (2006). Diese sprechen gar von einer „Rechtszersplitterung“ (Tauchmann et.al. 2006, S. 39).

2 Vgl. für eine Darstellung des Rechtsrahmen mit Fokus auf Abwasserentsorgung Bosseler et al. (2014)

3 Für Details des rechtlichen Rahmen der Energieversorgung vgl. die „Gesetzeskarte für das Gas- und Stromversorgungssystem“ (BMWi 2014).

Da sich die Teilsysteme im Verkehrssektor nicht ohne weiteres in die Logik der Übersicht der Wettbewerbsformen in den Sektoren der Ver- und Entsorgung einordnen lassen, wird für Verkehr eine etwas andere Struktur gewählt, um auch hierfür eine knappe Übersicht anzubieten.

Übersicht 2: Übersicht der Wettbewerbsformen/-intensitäten entlang der Wertschöpfungsketten in den Teilsystemen im Verkehr

| | Wertschöpfungsstufe | Verkehr Straße | Verkehr Bahn | Verkehr Wasser-straße | Verkehr Luft |
|---|---|---|---|---|---|
| Infrastruktur | Erstellung der Infra-struktur | Ausschreibung der Bauleistung | Ausschreibung der Bauleis-tung | Ausschreibung der Bauleistung | Wettbewerb basierend auf Lan-desplanung |
| | Netze | Kein Wettbewerb | Kein Wettbewerb | In geringen Maße Wettbewerb | Wettbewerb |
| Leistung | Verkehrsleistungs-erstellung<br>Vertrieb | Privat bzw. Unter-nehmensbezogen | Regionalverkehr: Wettbe-werb und Direktvergabe<br>Fernverkehr: eigenwirt-schaftliches Angebot der Verkehrsunternehmen (meist DB AG) | Wettbewerb | Wettbewerb |
| | Dienstleistungen | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb | Wettbewerb |
| | Sonstiges | | | | |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

# 3 Identifikation von Optionen und strategischen Ansatzpunkten zur Reduktion der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen

Im Folgenden wird die Identifikation von Optionen und strategischen Ansatzpunkten dargestellt, die Grundlage der Sondierung und Konkretisierung der Fallstudien „Ressourcenleichte Infrastruktursysteme“ ist. Hierzu werden für die vier Sektoren der technischen Infrastruktursysteme spezifische Veränderungsprozesse und Trends eingeführt. Diese sind zumindest in einzelnen Sektoren wie etwa der Energie stärker als die in Teil B Kapitel 1 benannten sektorenübergreifenden Veränderungsprozesse politisch formulierten Zielen und damit beabsichtigten Beeinflussungen unterworfen. Damit ergeben sich aus diesen Veränderungsprozessen (politisch motivierte) Wirkungen etwa auf Angebots- und Nachfragestrukturen (vgl. Bedarfe) oder auch Markt- und Kostenstrukturen.

Während die Zusammenstellung der relevanten Veränderungsprozesse und Zukunftstrends die wesentlichen **externen** Einflussgrößen behandelt, sollen des Weiteren auf Grundlage von SWOT-Analysen der Infrastruktursysteme[17] mögliche Optionen der ressourcenleichten **internen** Gestaltung und Handlungsmöglichkeiten dargestellt werden. Dabei werden sowohl bestehende als auch innovative, zukünftig denkbare Optionen berücksichtigt.

Die Optionen der ressourcenleichten Gestaltung können technischer Art sein. Sie können sich aber auch auf veränderte institutionelle Arrangements (u.a. Governance, ökonomische Mechanismen) beziehen. Technische Optionen sollten dabei nicht auf der Ebene von technischen Einzellösungen, sondern auf Ebene von „Technologiefeldern“ (Wietschel et al. 2010) oder Technologiebündeln behandelt werden. Für die identifizierten Optionen ist plausibel zu begründen, inwiefern und unter welchen Bedingungen sie zur Ressourcenleichtigkeit beitragen (können). Dabei gilt zu beachten, dass die meisten Optionen nicht zur Reduktion der Inanspruchnahme der betrachteten Ressourcen gleichermaßen führen, so dass (vermutlich letztlich nur kontextspezifisch) über die Auswahl von Optionen fachlich und politisch zu entscheiden ist.[18]

## 3.1 Energieinfrastruktur

In der Energieversorgung in Deutschland sind im Rahmen der klimaschutz- und energiepolitischen Zielsetzungen der Bundesregierung vielfältige und grundlegende Veränderungsprozesse sowohl auf der Ebene der Marktstrukturen[19] als auch im technologischen Bereich (u.a. in den Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten) angestoßen worden.

### 3.1.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends

Konkret gibt das Energiekonzept der Bundesregierung (2010) folgende politisch formulierten Ziele vor:

- Umstieg auf erneuerbare Energien;
- Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022;
- Klimaschutzziele: Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 % bis 2020, 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und 80–95 % bis 2050 (Vergleichsmaßstab: 1990);

17 Im Anhang (Teil F) sind die entwickelten SWOT-Matrizen der einzelnen Infrastruktursysteme einsehbar.

18 Beispielsweise können dezentrale Optionen der Stromerzeugung möglicherweise Netzausbaubedarf vermeiden, sie führen aber in anderen Bereichen zu zusätzlichem Ressourcenbedarf, zum Beispiel wenn zusätzliche Kraftwerke oder Speicher in bestimmten Regionen installiert werden müssen.

19 Im Zuge der Energiewende und des Ausbaus erneuerbarer Energien konnten neue Akteure Fuß fassen, die nicht nur neue räumliche Strukturen der Energieerzeugung und -verteilung bedingen, sondern auch die bekannte Marktstruktur der „Großen Vier“ (E.on, RWE, EnBW, Vattenfall) aufgebrochen haben.

- Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Brutto-Stromverbrauch auf 35 % im Jahr 2020 (17 % im Jahr 2011);
- Senkung des Stromverbrauchs um 10 % bis 2020 (Vergleichsjahr 2011);
- Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich;
- klimafreundliche Mobilität.

Neben diesen nationalen Zielvorgaben bestehen internationale Klimaschutzvereinbarungen[20] (z. B. Kyoto-Protokoll) aber auch europäische Regelungen etwa zu den Governance-Strukturen (vgl. Liberalisierung der Energiewirtschaft). Diese Zielvorgaben lösen wiederum Veränderungen bzw. Anpassungen als Reaktion der Akteure (im Energiesektor) aus. Vor diesem Hintergrund zeichnen sich, insbesondere bedingt durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (in Verbindung mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und mit den Klimaschutzzielen), folgende für die Energieinfrastrukturen relevante Veränderungsprozesse und Trends ab:

1. **Fluktuation**: Der Ausbau der Nutzung regenerativer Energien mit Wind und Photovoltaik(PV) als Hauptenergieträger führt zu einer volatilen Einspeisung von Strom in die Netze. Das bedeutet, dass die Erzeugung der Anlagen im Zeitverlauf wetterabhängig variiert. Damit gehen höhere Anforderungen an die Flexibilität im System für den Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch einher. Um diesen höheren Flexibilitätsbedarf zu decken, stehen zahlreiche Optionen zur Verfügung. Prinzipielle Optionen bestehen aus intelligentem Last- und Erzeugungsmanagement, Netzausbau sowie dem Ausbau von Speichern (Kurzzeit- und Langzeitspeicher).
2. Anschluss an **Verteilnetzebene**: Aus der partiellen Dezentralisierung ergibt sich eine tendenzielle Verschiebung der Erzeugungskapazitäten von den oberen Stromnetzebenen (Höchst- und Hochspannungsebene) auf die Ebene der Verteilnetze (Mittel- und Niederspannungsbereich). Als Folge davon wird ein Aus- und Umbau der Stromverteilnetze erforderlich. Eine neue Herausforderung für die Entwicklung der Verteilnetze besteht in der Lösung der grundlegenden Frage von weiterem Stromnetzausbau einerseits und der Steigerung der „Intelligenz im Netz“ (Smart Grids) andererseits, wodurch ein Netzausbau je nach lokaler Situation ggf. vermieden oder verzögert werden kann.
3. Neue **räumliche Verteilung** der Erzeugung: Tendenz zur „geografischen Dezentralisierung“[21] der Energieerzeugung durch Ausbau regenerativer Energien und Erschließung diffuser Quellen (z. B. Wärme). Zum Beispiel sind Mikro-BHKW für die Haushaltsebene marktreif und der Consumer wird potenziell zum Prosumer. Gleichzeitig findet aber auch eine „Zentralisierung“ statt, indem der Anteil lastferner Erzeugung durch regenerative Energien steigt. Räume mit hohen Energiebedarfen (Städte und industrielle Zentren) und die Räume der Energiebereitstellung etwa aufgrund räumlich differenzierter Potenziale für erneuerbare Energieträger fallen auseinander. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen für den Stromtransport auf nationaler, zunehmend auch auf europäischer Ebene. Insgesamt wird dadurch ein Aus- und Umbau der Stromnetzinfrastruktur insbesondere auf Übertragungsnetzebene notwendig. Ein weiterer Treiber hierfür ist auch die weitere Entwicklung des europäischen Strombinnenmarktes.
4. Auch durch die steigende Anzahl an Energieerzeugungsanlagen und anderen „aktiven“ Akteuren zum Beispiel auf der Verbraucherseite ergeben sich höhere Anforderungen an die **Koordination** und intelligente Steuerung des Energiesystems insgesamt. Dadurch kann sich auch die Notwendigkeit ergeben, die Steuerung des Systems zu dezentralisieren.

20 Zudem haben auf lokaler und regionaler Ebene in Deutschland Kommunen Selbstverpflichtungen und Klimaschutzziele beschlossen.

21 Vgl. für eine differenzierte Auseinandersetzung mit dem Begriff „Dezentralität“ und seinen Facetten im Energiesektor Bauknecht/Funke (2013).

5. Mit dem Ausbau Erneuerbarer Energien verschieben sich die **Kostenstrukturen** der Erzeugung. Bei den Erneuerbare-Energie-Anlagen liegen die Grenzkosten nahe null. Damit stellt sich im aktuellen Marktdesign die Frage der Finanzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit auch von konventionellen Anlagen.
6. Neue **Eigentümerstrukturen**: Im Zuge von Re-Kommunalisierungen des Infrastrukturbetriebs und von Unternehmen sowie der Gründung von Bürgerenergiegenossenschaften in Konkurrenz zu privaten (Groß-)Unternehmen[22] ergibt sich eine Diversifizierung der Marktakteure. Generell werden neue Rollen und Chancen für kommunale EVU (Stadtwerke) vermutet.

Neben den skizzierten Trends, die sich aufgrund des Ausbaus erneuerbarer Energien ergeben, lassen sich **weitere Trends** bestimmen.

Im Kontext von Energieeffizienz:

- Sinkender Energiebedarf für Raumwärme durch Effekte des Klimawandels und verbesserte Energieeffizienz von Gebäuden (energetische Sanierung), dafür ggf. mehr Bedarf an Raumkälte im Sommer.

Ökonomische Trends:

- Aktuell niedrige **Preise** im Großhandel für Strom und für $CO_2$-Zertifikate machen Strom aus Kohlekraftwerken gegenüber Gaskraftwerken vergleichsweise günstig. Daher rechnen sich effiziente Gaskraftwerke (momentan) nicht.[23] Mittelfristig ist eine weiterhin maßgeblich auf Kohle basierte Energieversorgung in Deutschland nicht mit den o.g. Klimaschutzzielen vereinbar.
- Die **Stromgestehungskosten** der Erneuerbare-Energie-Erzeugungsanlagen sinken und gleichen sich weiter denen der konventionellen Kraftwerke an bzw. werden absehbar unter diesen liegen (vgl. Kost 2013). Ein Beispiel für die Lernkurven und die damit einhergehenden Kostensenkungen bei den erneuerbaren Energien ist die Kostenentwicklung für Photovoltaik-Anlagen (vgl. Fraunhofer ISE 2016, S. 8).
- **Kostenstrukturen** und Marktdesign bieten steigende Anreize für eine Eigenverbrauchsmaximierung. Dadurch ergibt sich ggf. ein steigender Ressourcenbedarf durch die suboptimale Bereitstellung von Flexibilität im Netz, wenn durch eine dezentrale Ausregelung und eine schwächere Nutzung von Durchmischungseffekten in größeren Bilanzierungsräumen insgesamt mehr Flexibilität bereitgestellt werden muss.

Technologiebasierte bzw. Technologie getriebene Trends:

- Kürzere **Innovationszyklen** spielen in einem erneuerbaren Energiesystem eine größere Rolle (vgl. generische Veränderungsprozesse), teilweise bei den Erzeugungstechnologien (zum Beispiel PV und Wind), teilweise bei Speichertechnologien und teilweise auch durch die die verstärkte Rolle von Informations- und Kommunikationstechnologien im Energiesektor. Dadurch ergeben sich einerseits Chancen für effizientere/effektive Technologien. Gleichzeitig steigt das Risiko für „Fehlinvestitionen“, wenn zu früh auf eine technologische Innovation gesetzt wird, die sich entweder nicht durchsetzt oder in ihrem Frühstadium noch sehr fehleranfällig ist.
- Viele Szenarien gehen davon aus, dass neue Stromverbraucher an Bedeutung gewinnen werden (z. B. Wärmepumpen) (vgl. div. Energieszenarien oder Wietschel et al. 2010).

22 Vgl. für eine Übersicht trendresearch, Anteile einzelner Marktakteure an Erneuerbare Energien-Anlagen in Deutschland (2. Auflage), 2013, in: ZfK.

23 „Die zunehmende Differenz zwischen Gas- und Steinkohlepreisen und der sinkende $CO_2$-Preis führen zu einem weiteren Auseinanderklaffen der Erzeugungskosten von Steinkohle und Gaskraftwerken.“ (Agora 2014, S. 12).

- Technologische Innovationen werden zukünftig weitere bzw. stärkere **Sektorkopplungen** mit anderen Infrastruktursektoren ermöglichen, ggf. verbunden mit der Umwandlung von Strom in andere Energieformen (Power-to-Heat/Gas/Liquid) und ggf. auch mit einer Rückverstromung (Power-to-Gas-to-Power) (vgl. Wietschel et al. 2010).

Mit Blick auf die zukünftige **Nachfrageentwicklung** in der Energieversorgung zeichnet sich ein wenig eindeutiges Bild ab. Zu zukünftigen Energiebedarfen und dem Energiemix existiert eine Reihe von Studien und Szenarien, die zum Teil zu gegensätzlichen Ergebnissen und Annahmen kommen. Vor dem Hintergrund der Unsicherheiten geht die Bundesnetzagentur für die Stromversorgung für die kommenden zehn bis 20 Jahre weiterhin von einem insgesamt konstanten Stromverbrauch aus (Bundesnetzagentur 2013, S. 81). Denn obwohl davon auszugehen ist, dass sich Erfolge bei der Energieeinsparung und der Energieeffizienz einstellen werden, dürfte die so erzielte Reduzierung des Stromverbrauchs durch Wirtschaftswachstum und neue technische Anwendungen kompensiert werden. Dies gilt insbesondere für die Bereiche der Wärmeversorgung und Mobilität, in denen fossile Energieträger (Benzin, Kohle, Gas) absehbar durch regenerativ gewonnenen Strom bzw. aus regenerativem Strom erzeugte Gase ersetzt werden (vgl. hierzu Peter 2013, S. 26).

Eine weitere wichtige Veränderungstendenz besteht in der Annahme rückläufiger Gasverbrauche zur Wärmenutzung in privaten Haushalten. Zum ersten wirken hier die steigenden Temperaturen aufgrund des Klimawandels und zum zweiten die Maßnahmen zur besseren Dämmung sowohl im Bestand als auch insbesondere bei Neubauten (vgl. UBA 2010, S. 23 ff.).

### 3.1.2 Optionen zur Anpassung der Energieinfrastruktur

Im Bereich der Energieinfrastruktur dürften, ausgewählt aus der enormen Fülle an Möglichkeiten und technischen Lösungen, die nachfolgenden Optionen zur Weiterentwicklung und Umgestaltung der Infrastrukturen im Hinblick auf Ressourcenleichtigkeit (und als weitere Elemente des Zielsystems umweltschonende, robuste, demografiefeste Eigenschaften) besondere Relevanz haben. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Optionen im Energiesektor nach den Bereichen Erzeugung, Lastmanagement und Speicher, Transport/Netze, Energieeffizienz, und Governance/Institutionen/Koordination gruppiert. Dabei können die einzelnen Optionen in den verschiedenen Bereichen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Optionen können einander voraussetzen (z. B. wenn die Nutzung von Flexibilität durch Lastmanagement und Speicher einen Netzausbau voraussetzt) oder auch gegeneinander konkurrieren (zum Beispiel regionaler Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch durch Lastmanagement und Speicher vs. Netzausbau).

#### 3.1.2.1 Erzeugung:

- Erneuerbare Energien-Anlagenausbau, der den Flexibilitätsbedarf möglichst reduziert: Schwachwindanlagen, Wasserwirbelkraftwerke, die PV-Ausrichtung, unter Flexibilitätsbedarfen optimierter Mix Erneuerbarer Energien;
- Brennstoffzellen (weit skalierbar) von Quartierebene über Hausebene bis zu kleinen mobilen Einheiten;
- Mischung konditionierter Gase verschiedener Herkunft; z. B. Einspeisung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und Methan ins Gasnetz (Power-to-Gas) (auch wenn hier aufgrund des aktuell noch geringen Wirkungsgrads und derzeit geringer EE-Überschüsse zunächst eine relativ hohe Ressourceninanspruchnahme auftreten kann);

- Steigerung der Wirkungsgrade bei Kraftwerken (insbesondere erneuerbarer Energieträger, aber – vorübergehend – auch konventioneller Art auf Basis von Gas[24], Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung[25]).

#### 3.1.2.2 Lastmanagement und Speicher:

- Lastmanagement insb. auf lokaler und regionaler Verteilnetzebene;
- Möglichst geringer Ausbau von neuen Speicherkapazitäten (insb. Batterien) und Nutzung existierender Speicher (z. B. Gasspeicher);
- Power-to-Heat, Wärmespeicher und – netze;
- Power-to-Gas und Power-to-Liquid (auch wenn hier aufgrund des aktuell noch geringen Wirkungsgrads und derzeit geringer EE-Überschüsse im Gesamtsystem zunächst eine höhere Ressourceninanspruchnahme auftreten kann).

#### 3.1.2.3 Transport/Netze:

Grundsätzlich ist hier eine Abwägung zwischen Stromnetzausbau und Ausbau anderer Flexibilitätsoptionen wie zum Beispiel Lastmanagement und Speicherkapazitäten (s.o.) notwendig. So gesehen hängen die Optionen immer von bestimmten Rahmenbedingungen, Voraussetzungen, Implikationen und Einschränkungen ab.

- Ausbau regionaler Strukturen auf der Verteilnetzebene (wenn lokale Flexibilität nicht durch den Einsatz ressourcenintensiver Optionen, z. B. Batterien, bereitgestellt werden muss, sondern durch Lastmanagement und mit den vorhanden Erzeugungs- und Speicherkapazitäten sichergestellt werden kann);
- Realisierung von Smart Grids dort, wo andere Maßnahmen aufwändiger wären (allerdings wäre eine flächendeckende Einführung von Smart Grids nicht unbedingt ressourcenleicht, weil entsprechende Technologien auch mit einem Ressourcenverbrauch einhergehen und gleichzeitig nur in bestimmten Netzen und nicht unbedingt flächendeckend benötigt werden);
- Mit Blick auf Wärmenetze: Integration dezentraler Wärmeeinspeisung in bestehende Netze (u.a. bei Senkung von Vor- und Rücklauftemperaturen), den Aufbau und die Optimierung neuer Netze unter Berücksichtigung innovativer Techniken (z. B. Speicher) sowie die energetische Effizienzsteigerung bestehender Netze, ggf. Kopplung von Kälteerzeugung und Wärmenetzen (Wietschel et al. 2010, S. 256).

#### 3.1.2.4 Energieeffizienz

Diese Optionen fokussierten insbesondere die Steigerung der Effizienz bei den einzelnen Umwandlungsschritten von Primär- in End- und Nutzenergie.

- Steigerung der Energieeffizienz, etwa durch den Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplung und Blockheizkraftwerken, damit verbunden ein Ausbau von Wärme- und Kältenetzen, aber auch der Energieeffizienz bei Endkunden (Industrie, Haushalte, Gewerbe/Dienstleistung/Handel, Verkehr) und den verschiedenen Anwendungen ;
- Senkung der Vorlauftemperatur (von i.d.R. 90°C auf ca. 40°C an Gebäudeübergabestelle) in Wärmenetzen, was die Exergieausnutzung bei der KWK weiter erhöhen und zu mehr Energie-

24 „Heutige Gasturbinen erreichen je nach Größe einen Wirkungsgrad von 38 bis über 40 %. Die Kopplung von Gasturbine und Dampfkreislauf ermöglicht höchste Wirkungsgrade. Heutige GuD-Kraftwerke erreichen einen Netto-Wirkungsgrad von ca. 58–59 %“. Ein Wirkungsgrad von über 60 % ist möglich (Wietschel et al. 2010).

25 Moderne BHKW-Anlagen erreichen durchschnittliche Gesamtwirkungsgrade von 87 %. Maximale Gesamtwirkungsgrade erreichen sogar 99 % (ASUE 2011).

effizienz führen kann. So ergeben sich auch Möglichkeiten, niederkaloriseche Wärmequellen (Bsp. Abwasserwärme) mit niedrigeren Temperaturen oder die Wärmeeinspeisung auf Basis erneuerbarer Energien zu nutzen (Wietschel et al. 2010, S. 259).

### 3.1.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Stromversorgung“

Für die Stromversorgung wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der in Teil A beschriebenen Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Zur Erinnerung: Die ausgemachten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken wurden in eine SWOT-Matrix überführt und dann Bezüge (Relationen) zwischen den einzelnen Spalten und Zeilen der Matrix eingetragen. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[26]:

Stärken:

- Governance-Strukturen und (rechtliche) Regelsysteme werden immer wieder überprüft und angepasst bzw. entwickeln sich selbst dynamisch aus veränderten Rahmenbedingungen (weiter) („das System lebt“);
- Aktuell hohe Flexibilität im System vorhanden (Erzeugungskapazitäten, europäisches Verbundnetz);
- Hohe Innovationsdynamik in der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und technischer Optionen (u.a. Speichertechnologien, Lastmanagement).

Schwächen:

- Wirtschaftlichkeit von Investitionen unsicher;
- Hohe Unsicherheit über zukünftige Systemstrukturen.

Chancen:

- Potenziale in anderen Sektoren zur Aufnahme von EE-Überschüssen.

Risiken:

- Zunehmender Flexibilitätsbedarf durch fluktuierende erneuerbare Energien, Flexibilitätspotential konventioneller Kraftwerke nimmt ab;
- Netzumbaubedarf durch erneuerbare Energien;
- Hohe Unsicherheit bezüglich einer dezentral oder zentral ausgerichteten Struktur.

### 3.1.4 Strategische Ansatzpunkte für die Stromversorgung

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautet: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem Stromversorgung in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

26 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

- Der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung eröffnet die Chance, umweltfreundlichen, ressourcenleichten, erneuerbaren Strom als Ersatz für fossile Primärenergieträger auch in anderen Sektoren zu nutzen. Allerdings muss dabei sichergestellt werden, dass tatsächlich erneuerbare Energien in den anderen Sektoren genutzt werden und durch die Infrastruktursystemkopplungen keine neuen Pfadabhängigkeiten geschaffen werden, die einen hohen Ressourcenverbrauch festschreiben. [St 1][27]
- Die aktuell hohe Flexibilität im Stromsektor bietet die Möglichkeit, die Kopplungen zwischen Infrastruktursystemen (Strom – Wärme, Strom – Mobilität) Schritt für Schritt auf- und auszubauen. So können sukzessive auch Flexibilitätsoptionen für den Stromsektor aufgebaut werden, die z. T. auf vorhandene Infrastrukturen zurückgreifen können. [St 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Innerhalb der Energiewende hin zu erneuerbaren Energien bestehen hohe Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Sektorstruktur, sowohl bezüglich der zur Verfügung stehenden Technologien als auch bezüglich der Frage einer dezentral oder zentral ausgerichteten Sektorstruktur. [St 3]
- Der Umgang mit diesen Unsicherheiten ist durch ein Dilemma gekennzeichnet. Einerseits müssten die bestehenden (politischen) Zielvorgaben klarer ausgewiesen und kohärent instrumentiert werden, um Richtungssicherheit für die Akteure (und ihr Handeln/Investitionsentscheidungen) zu bieten. Ein wichtiger Schritt könnte hierbei die Verknüpfung der hohen Innovationsdynamik mit langfristigen Entwicklungszielen und notwendigen Zwischenschritten sein. Dabei gilt es robuste Pfade zu entwickeln, um so auch aus Ressourcensicht Fehlallokationen zu vermeiden. [St 4]
- Andererseits ist der laufende Transformationsprozess offen genug zu gestalten, um Raum für Innovationen und Lernen zu lassen und ggf. Fehlentwicklungen entgegensteuern zu können. [St 5]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Chancen zur Weiterentwicklung des Stromsystems wie etwa die Potenziale zur Aufnahme von EE-Überschüssen in anderen Sektoren oder die zunehmend vielfältigeren Erzeuger- bzw. Akteurstrukturen und damit verbundene Innovationspotenziale können insbesondere dann gehoben werden, wenn es gelingt die Governance-Strukturen (auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene) so auszugestalten, dass sie eine Verständigung über und Ausrichtung an langfristigen Zielen ermöglichen. [St 6]
- Dann könnten die Governance-Strukturen einen Beitrag leisten, die (institutionellen) Rahmenbedingungen für Innovationen sowie rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen für Investitionen zu verbessern. [St 7]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen-Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Die Energiewende erfordert einen Ausbau von Flexibilität. Speicherkapazitäten, Lastmanagement und ein Umbau der Netze sind die gängigen diskutierten Flexibilitätsoptionen. In den drei Feldern sollten die Rahmenbedingungen für Investitionen weiterentwickelt werden.

27 Die hier angegebenen Codierungen (St für Strom) werden in Teil C Kapitel 2 in der Beschreibung der Fallstudien wieder aufgegriffen. Damit soll dem Leser die Herleitung der Fallstudien nachvollziehbar dargelegt werden.

Gleichzeitig bestehen innerhalb der Energiewende hin zu erneuerbaren Energien hohe Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Sektorstruktur; dies bezieht sich sowohl auf die zur Verfügung stehenden Technologien als auch auf die Frage einer dezentral oder zentral ausgerichteten Struktur der Stromversorgung. Vor diesem Hintergrund wären flexible und skalierbare Problemlösungen (bzw. technischen Optionen) zu fördern. [St 8]

- Aus Sicht der Unternehmen könnten mit Blick auf den Umgang mit den Unsicherheiten die Rahmenbedingungen so gestaltet werden, dass die Wirtschaftlichkeit von Investitionen verbessert wird. Zugleich sollte das Risiko von sich entwickelnden (neuen) Pfadabhängkeiten beobachtet und aktiv gemanagt werden. [St 9]

### 3.1.5 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Gasversorgung“

Für die Gasversorgung wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[28]:

Stärken:

- Gasnetze können in bestimmten Grenzen (d. h. bis zu bestimmten Mischungsverhältnissen) Gase verschiedener Herkunft transportieren (Erdgas, Methan, Wasserstoff). [Flexibilität]
- Gas als Speichermedium für regenerative Energien (Power-to-gas). [Kopplungen]

Schwächen:

- Relativ geringe Wirkungsgrade und damit verbunden hohe Kosten bei der Umwandlung von Strom zu Gas (Poxer-to-gas).

Chancen:

- (regenerative) Gase stellen einen wichtigen Baustein der "Energiewende" dar und können als potenzieller Energiespeicher (Power-to-Gas) und anschließend für die Nutzung zur Stromerzeugung (Gasturbine, KWK) sowie in anderen Sektoren und Anwendungen genutzt werden.

Risiken:

- Siedlungsstrukturelle Trends führen zu einer weiteren "Entdichtung" der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich).
- sinkende Raumwärmebedarfe (Passivhäuser, energetische Sanierung im Bestand und Klimawandel).

### 3.1.6 Strategische Ansatzpunkte für die Gasversorgung

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem Gasversorgung in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

28 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

- Zuvor wurden die Flexibilität der Gasnetze, in bestimmten Grenzen Gase verschiedener Herkunft (d. h. bis zu bestimmten Mischungsverhältnissen) transportieren zu können und die Kopplungsfähigkeit mit der Stromsystem (Stichwort Power-to-Gas und KWK) als Stärken der Gasversorgung identifiziert. Diese Stärken gilt es in den Diskursen zur künftigen Ausgestaltung der Energiewende zu nutzen und herauszustellen. Insbesondere die Vernetzung der Gas und Strominfrastrukturen, um Gas und die entsprechenden Infrastrukturen als Speicher für regenerative Energien zu nutzen, bietet einen strategischen Ansatzpunkt auf bestehende Infrastrukturen zurückzugreifen und diese multifunktional einzusetzen. [G 1]
- Dementsprechend könnten ein multifunktionaler Einsatz und die Weiterverwendung bestehender Gasnetze und -anlagen Synergien zum Stromsektor heben und wechselseitig Auslastungsrisiken reduzieren bzw. die Nutzung bestehender Infrastrukturen intensivieren. [G 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Die skizzierten Stärken der Gasversorgung (Flexibilität, Kopplungspotenziale) unterstützen Bestrebungen zu größerer Unabhängigkeit internationaler Gasbezugsquellen. Um Versorgungssicherheit bei stärkerer nationaler Gaserzeugung zu gewährleisten sind einerseits quantitativ ausreichend aber auch hinreichend diversifizierte (regenerativen) Gasquellen in Deutschland zu erschließen. Dies kann zunächst mit einem Ressourcenaufwand für den Bau von z. B. Kläranlagen zur Biogasgewinnung und Power-to-Gas-Anlagen einhergehen. [G 3]
- Die mit absehbar sinkenden Raumwärmebedarfen und einer Stärken Nutzung von strombasierten Raumheizungssystemen verbundenen Auslastungsrisiken der Gasversorgung dürften perspektivisch eine baulich-technische Anpassung (Um- und Rückbau) der Infrastrukturen erfordern. Andererseits tun sich mit den o.g. flexiblen Kopplungen (Power-to-Gas, Biogas) Potenziale auf, bestehende Gasnetze ökonomisch und effizient weiter zu betreiben. [G 4]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Die relativ geringen Wirkungsgrade und damit verbundenen hohen Kosten bei der Umwandlung von Strom zu Gas stellen in Kombination mit der Einschätzung, dass aktuell in der Gasversorgung nur geringe Potenziale zur Ressourcenoptimierung gesehen werden, eine Schwäche im bestehenden Gasversorgungssystem dar. Um die skizzierten Chancen und Stärken nutzen zu können, kann ein strategischer Ansatzpunkt in der Förderung von Forschung und Entwicklung in diesem Kontext liegen. [G 5]
- Die insgesamt hohe Dynamik technischer Entwicklung im Energiebereich und die Relevanz der Gase im Rahmen der Energiewende bieten Ansatzpunkte, die Umwandlung von Strom zu Gas technisch und systemisch zu verbessern. Denn grundsätzlich sollte der Rückgriff auf bestehende Netze (Ausreizen ihrer technischen Lebens- bzw. Nutzungsdauer nötig!) und damit die Vermeidung von umfangreichen Neubauten zur Ressourcenleichtigkeit beitragen. [G 6]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- In die zuvor eingeschlagene Richtung für strategische Ansatzpunkte zur ressourcenleichten Gestaltung der Gasinfrastrukturen weist auch die Überlegung, dass die als Schwäche identifizierten hohen Fixkosten und die beim Bau der Infrastrukturen zu verzeichnenden „sunk cost“ (Kluge, Scheele 2003, S. 18) und hohen Rückbaukosten ökonomische Anreize bieten, bestehende Netze für eine multifunktionale (Kopplung) Weiternutzung anzupassen/auszulegen. [G 7]

### 3.1.7 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Wärmeversorgung“

Für die Wärmeversorgung wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[29]:

Stärken:

- Institutionelle Spielräume der Kommunen bei Planung und Betrieb (u.a. Satzungen, B-Pläne);
- Wärmenetze vor Ort gestalt- und skalierbar (zentrale Fernwärme, semi- und dezentrale Nahwärmenetze) [Skaleneffekte beachten];
- Wärmenetze theoretisch auch für Kälteanwendungen nutzbar [Kopplungen, Flexibilität].

Schwächen:

- Unklare Preisgestaltung, keine Transparenzpflicht bei Kalkulationsgrundlagen (ggf. Akzeptanzprobleme bei Kunden, aufwendige Preisprüfung durch Kartellamt);
- Mindestdichten in Siedlungsstrukturen (EW/m Netzlänge) notwendig, da sonst nicht rentabel/effizient.

Chancen:

- Wärmenetze als Energiespeicher (Power-to-heat) [Kopplungen].

Risiken:

- Siedlungsstrukturelle Trends und demografischer Wandel führen zu weiterer "Entdichtung" der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich);
- sinkende Raumwärme-bedarfe (Passivhäuser, energetische Sanierung im Bestand und Klimawandel).

### 3.1.8 Strategische Ansatzpunkte für die Wärmeversorgung

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem (netzgebundener) Wärmeversorgung in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Die Chance, Wärmenetze als Energiespeicher zu nutzen, indem sie mit der Stromversorgung gekoppelt werden (Power-to-Heat, Abwasserwärme) (Kopplungspotenziale) und die Möglichkeit, Wärmenetze vor Ort flexibel zu gestalten und zu skalieren, bieten Ansatzpunkte, ihre Gestaltung unter dem Gesichtspunkt von Ressourceneffizienzpotenziale und Ressourcenleichtigkeit strategisch zu angehen. Auch die institutionellen Spielräume der Kommunen bei Planung und Betrieb (u.a. Satzungen, B-Pläne) sowie Governance-Strukturen (Kommune, kommunale Unternehmen) können diesen Ansatz unterstützen. [Wä 1]

29 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Für die Planung, Gestaltung und Betrieb von Wärmenetzen bestehen ortsspezifische und kommunale (formale) Handlungsspielräume (Satzungen, Anschluss- und Benutzungszwang, Stadtplanung, etc.). Diese können so ausgelegt werden, dass potentiellen Risiken einer „Entdichtung“ und sinkenden Auslastung der Netze begegnet wird. Denkbar wären ggf. die bauliche Anpassung der Netze (Umbaukosten sind zu berücksichtigen) und die in der strategischen Stadtentwicklungsplanung bereits mitgedachten Wechselwirkungen mit den technischen Infrastruktursystemen und sich daraus ergebenden Möglichkeiten oder Restriktionen (z. B. planerisches Einwirken auf die Verortung und Potenziale von Wärmequellen und -senken). [Wä 2]

### 3.1.9 Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Die hohe Forschungs- und Entwicklungsdynamik im Rahmen der Energiewende (die mit Blick auf Wärmeversorgung zu stärken wäre) kann genutzt werden, um ggf. verdeckte Potenziale für Vernetzung und Kopplung mit anderen stadttechnischen Infrastruktursystemen zu erschließen und damit auf den identifizierten Stärken aufzubauen. [Wä 3]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Es bestehen enge technische und ökonomische Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Siedlungsstrukturen und stadttechnischen Infrastrukturen. Beide sind durch Pfadabhängigkeiten (begründet u.a. in Lebensdauern, Ausstiegskosten, etc.) gekennzeichnet. Umso wichtiger ist es, in der strategischen Stadtentwicklungsplanung beide integriert zu betrachten und nach Synergien zu suchen. Ziel sollte es sein, durch integrierte Stadtentwicklungsplanung Siedlungsstrukturen so weiterzuentwickeln, dass bestehende Netze erhalten und ihre Auslastung gestärkt wird. [Wä 4]
- Sofern die Kommunen nicht mit dem Instrument des Anschluss- und Benutzungszwangs arbeiten wollen, könnte ein weiterer strategischer Ansatzpunkt für die netzgebundene Wärmeversorgung darin bestehen, durch transparente Kostenstrukturen und differenzierte Preisgestaltung ihre Attraktivität für die (potenziellen) Kunden zu maximieren. [Wä 5]

## 3.2 Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur

### 3.2.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends

Die Dynamik in den Sektoren der Wasserver- und Abwasserentsorgung ist nicht mit der Dynamik im Rahmen der Energiewende vergleichbar. Die Siedlungswasserwirtschaft, d. h. die Trinkwasserver- und Abwasserentsorgung/Stadtentwässerung, zeichnet sich in Deutschland durch ein ausgesprochen hohes Qualitätsniveau und hohe Stabilität der Strukturen aus (ATT et al. 2015). Gleichwohl lassen sich einige spezifische Veränderungsprozesse der Rahmenbedingungen und Herausforderungen ausmachen:

- Sinkende Wasserentnahmen und -verbrauch insbesondere in der Industrie (z. B. geschlossene Wasserkreisläufe) und – wenn auch in geringerem Maße – in Haushalten. Hier wirken u.a. der demografische Wandel und Wassersparmaßnahmen.

- Rückgang der Einwohner pro km Netzlänge durch demografischen Wandel (Einwohnerrückgang) und siedlungsstrukturelle Trends: Letztere wirken durchaus auch in wachsenden Regionen etwa durch Wanderungsbewegungen in den Städten und die Ausweitung der Wohnfläche pro Kopf bzw. der Verkleinerung der Haushaltsgrößen (zunehmend Single-Haushalte).
- In den fachlichen Debatten der Siedlungswasserwirtschaft wird zunehmend größeres Augenmerk auf Ressourceneffizienz gelegt. Insbesondere die Steigerung der Energieeffizienz von Kläranlagen (Umweltbundesamt 2009) und die Nutzung der thermischen und chemischen Energiepotenziale im Abwasser stehen im Fokus (und bieten Anschlussfähigkeit an die Debatten zu Klimaschutzzielen und steigenden Energiepreisen) (Grazer Energieagentur 2007). In diesem Kontext ist auch die Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasserstrom oder Klärschlamm ein Thema.
- Zunehmend gerät die Differenzierung der Wasserströme im Sinne von Stoffströmen mit ihren spezifischen Qualitäten und Nutzen in den Blick der siedlungswasserwirtschaftlichen Akteure. Dies betrifft insbesondere die Trennung von Schmutz- und Regenwasser (wo noch keine Trennsysteme vorliegen) und Maßnahmen zum dezentralen Regenwassermanagement. Aber auch weitergehende Differenzierungen in Brauchwasser, Trinkwasser, Grauwasser oder Schwarzwasser werden diskutiert (Davoudi et al. 2016; Kluge/Libbe 2010).
- Nitratbelastung der Rohwasservorkommen.
- Anthropogene Mikroverunreinigungen z. B. aus Human- und Veterinärarzneimitteln, Industriechemikalien und Produkten des täglichen Bedarfs können eine schädigende Wirkung auf die Umwelt haben. Ihr Eintrag in die Umwelt und die Gewässer kann durch Vermeidungs- und Minderungsstrategien (z. B. Substitution durch umweltverträgliche Stoffe, abwasserfreie Produktionsverfahren) reduziert werden und durch die Anwendung optimierter (weitergehender) Abwasserbehandlungstechniken (Gawel et al. 2015; UBA 2015a).

Wie oben beschrieben ist die Menge abgegebenen Trinkwassers der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland je Einwohner und Tag seit Jahren rückläufig. Inwiefern sich dieser Trend in der **Bedarfsentwicklung** fortsetzen wird, ist nur bedingt abzuschätzen. Auch wenn man Faktoren wie Haushaltseinkommen, Haushaltsgröße, demografische Entwicklung, Wasserpreisentwicklung, Temperaturen und Niederschlag in quantitative Abschätzungen für die zukünftige Bedarfsentwicklung mit einbezieht, lassen sich keine einheitlichen und widerspruchsfreien Tendenzen bestimmen (Schleich/Hillenbrand 2007). Wie problematisch Bedarfsentwicklungsabschätzungen sein können, zeigt ein Blick auf frühere Prognosen, die durch die reale Entwicklung widerlegt wurden. Im Jahr 1980 wurde von der TU Berlin ein Pro-Kopf-Wasserverbrauch für Westdeutschland von durchschnittlich 219 Litern im Jahr 2000 prognostiziert. Tatsächlich lag der Verbrauch 2000 bei ca. 129 Litern (BDEW 2012).

### 3.2.2 Optionen zur Anpassung der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur

Eine wichtige Randbedingung für die Optionen im Kontext der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen sind deren auch im Vergleich zu den anderen Infrastruktursystemen lange Lebensdauern (50 bzw. 80 Jahre und z. T. noch länger) und damit verbunden deren Investitions- und Abschreibungszeiträume. Optionen zur (ressourcenleichten) Umgestaltung der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen lassen sich nur dann praktisch entwickeln und umsetzen, wenn ein Umbau der Wasserinfrastrukturen durch das Erreichen der Lebensdauern der Anlagen/Netze, bzw. bei umfassenden Instandsetzungsinvestitionen (mit entsprechender Ressourceninanspruchnahme), notwendig wird.

Ferner ist bei der Auseinandersetzung mit Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme im Wassersektor zu beachten, dass eine Bilanzierung und Vergleich der Ressourceninanspruchnah-

men im Bau und Betrieb bei eher zentralen (große Netzlängen) und semi- bzw. dezentralen Lösungen nur im konkreten Einzelfall zu kalkulieren ist (etwa Ressourcen für Kanalnetz und zentrale Abwasserbehandlungsanlage gegenüber möglichen Einsparungen an Netzlänge bei semizentralen Abwasserbehandlungsanlagen oder mobilem Transport). Dies gilt für viele weitere „innovative Systemlösungen" der Wasserwirtschaft wie Stoffstromtrennsysteme, Abwasserwärmerückgewinnung und Neuartige Sanitärsysteme (NASS).

Mögliche, jedoch stets im Einzelfall zu prüfende Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme sind:

- Dezentrales, nicht-leitungsgebundenes Regenwassermanagement: Versickerung und naturnahe Ableitung sauberen Regenwassers;
- semi- und dezentrale Anlagen und Netze mit Fokus auf Stoffstromtrennung und Wasserkreisläufen (z. B. Grauwasserrecycling, Regenwassermanagement); u.a. lokale Gewinnung und Nutzung von Brauchwasser (einfachstes Beispiel: Regentonne im Garten);
- Wärmerückgewinnung aus Abwasser (dezentral im Haus, semizentral im Kanal);
- Klärschlammvergärung zur Klärgasgewinnung (mit anschließender energetischer Nutzung etwa in BHKW);
- Rückgewinnung von Nährstoffen aus dem Abwasser (insbesondere Phosphat und Nitrat);
- Steigerung der Energieeffizienz von zentralen Abwasseranlagen.

### 3.2.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Wasserversorgung"

Für die Wasserversorgung wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[30]:

Stärken:

- lokale Steuerung und Entscheidung zur Gestaltung des Systems (lokal angepasst);
- lokal und regional autonome Infrastruktursysteme;
- hohe Qualität der Versorgungsinfrastrukturen (geringe Verlustrate und Einhalten der TW-Qualitäten).

Schwächen:

- technische Innovationen setzen sich kaum durch (Konservatismus).

Chancen:

- Energiefrage (Nutzung der Energiepotenziale) gerät in den Fokus der Wasserversorgung (Beitrag zur Energiewende);
- Augenmerk auf Ressourceneffizienz und Stoffströme.

Risiken:

- Finanzielle Engpässe der Kommunen (Schuldenbremse);
- TTIP, CETA verändern institutionelle Grundlagen der Wasserversorgung.

30 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

### 3.2.4 Strategische Ansatzpunkte für die Wasserversorgung

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem der Wasserversorgung in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Da Wasserversorgungsinfrastrukturen lokal betrieben, organisiert und in kommunaler Selbstverwaltung verantwortet werden, kann über das „Ob“ und “Wie“ ihrer Anpassung bzw. Umgestaltung prinzipiell vor Ort entschieden werden. Die Diskussionen um die Energiewende, spezifischer: die Nutzung der Energie(einspar)potenziale in der Siedlungswasserwirtschaft, sowie die (umweltpolitischen) Forderungen nach Ressourceneffizienz und Stoffstrommanagement bieten dazu eine Hintergrundfolie, die den lokalen Akteuren einerseits Orientierung (Ziele) bieten kann, andererseits die (notwendige) Anpassung argumentativ stützt. [TW 1][31]
- Die hohe Qualität der Wasserversorgung sowie das gute Image und hohe Vertrauen, das kommunale Wasserunternehmen bei den Bürgerinnen und Bürgern genießen, kann als Stärke in die Suche nach sektorübergreifenden Kopplungen eingebracht werden. Das Image könnte durch ein proaktives Vorgehen im Anpassungs-/Weiterentwicklungsprozess der Infrastrukturen weiter gestärkt werden, indem sich kommunale Infrastrukturunternehmen als Innovationstreiber positionieren. Integrierte Organisationsstrukturen können hierbei ermöglichenden Charakter haben. [TW 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Die engen finanziellen Handlungsspielräume der Kommunen setzen einen harten Rahmen für Investitionen in eine Anpassung der Infrastruktur. Als weiteres potenzielles Risiko können hier die möglichen Veränderungen der TTIP-Verhandlungen und ihre ordnungspolitischen, regulativen und fiskalischen Wirkungen auf die kommunale Daseinsvorsorge eingetragen werden. Beide Faktoren sind exogen gegeben und von den lokalen Infrastrukturbetreibern/Kommunen nicht beeinflussbar. Gleichwohl können die hohe Qualität der Wasserversorgung sowie das gute Image und hohe Vertrauen, das kommunale Wasserunternehmen bei den Bürgerinnen und Bürgern genießen, im politischen Diskurs in Wert gesetzt werden – sei es kommunalpolitisch bei Fragen der Gebühren-/Tarifanpassung vor Ort oder auch im Sinne politischer Kampagnen zur Wahrung der öffentlichen Daseinsvorsorge. [TW 3]
- Das Vollkostendeckungsprinzip und die langen Abschreibungszeiträume geben (finanzielle) Stabilität und Planungssicherheit und können dazu beitragen, Finanzierungs- und Investitionsprobleme im Zuge einer kommunalen Finanzkrise abzumildern. [TW 4]
- Megatrends wie demografischer Wandel oder Klimawandelfolgen können negative Wirkungen auf die Wasserversorgungsinfrastrukturen bzw. die Qualitäten der Versorgung haben. Die Vulnerabilität und konkreten Risiken für die Infrastrukturen hängen jedoch von lokal spezifischen und oftmals kleinräumlichen Kontextbedingungen (Topografie, Netzkonfiguration, Siedlungsstruktur, etc.) ab. Eine Analyse der Vulnerabilitäten und die Suche nach (notwendigen) Antworten zur Steigerung der Resilienz kann auch genutzt werden, lokal angepasste, ressourcenleichte, intelligente Systemlösungen zu entwickeln. [TW 5]

31 Die hier angegebenen Codierungen (TW für Trinkwasser) werden in Teil C in der Beschreibung der Fallstudien wieder aufgegriffen. Damit soll dem Leser die Herleitung der Fallstudien nachvollziehbar dargelegt werden.

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Eine identifizierte Schwäche der Wasserversorgung (weniger der technischen Infrastruktur als solcher, denn der institutionellen, finanziellen und mentalen Pfadabhängigkeiten) sind Innovationsbarrieren, die eine Implementation innovativer Infrastrukturen und damit ggf. höhere Ressourceneffizienz erschweren. Die als Chancen identifizierten Prozesse der Energiewende und damit eine gestiegene Relevanz der „Energiefrage" in der Wasserwirtschaft könnte zum Anlass genommen und konstruktiv genutzt werden, um Innovationsbarrieren zu identifizieren und anzugehen. Weiterentwicklungen und Innovationen in die Wasserversorgungsinfrastruktur können einen Beitrag leisten, die Risiken des demografischen Wandels und des Klimawandels zu minimieren. [TW 6]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen-Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Um die Wasserversorgung insbesondere vor dem Hintergrund des demografischen Wandels und der o.g. siedlungsstrukturellen Trends auch künftig finanzieren zu können, scheint eine Anpassung des Tarifsystems (höhere Grundgebühren und geringere variable Anteile) angemessen. Dies ist grundsätzlich notwendig, wenn (zusätzliche) finanzielle Spielräume für die Anpassung/Weiterentwicklung zu ressourcenleichten Wasserinfrastrukturen (flexiblen Systemlösungen) gewonnen werden müssen. [TW 7]
- Die hohe Qualität der Wasserversorgung sowie das gute Image und hohe Vertrauen, das kommunale Wasserunternehmen bei den Bürgerinnen und Bürgern genießen, kann in der politischen Kommunikation genutzt werden, um Herausforderungen proaktiv im öffentlichen Diskurs anzugehen. [TW 8]

### 3.2.5 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Abwasserentsorgung"

Für die Abwasserentsorgung wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[32]:

Stärken:

- Kostendeckungsprinzip;
- Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme vorhanden (Optimierung);
- Optionen zur tiefgreifenden Veränderung (Transformation) in Nischen vorhanden.

Schwächen:

- lange Abschreibungszeiträume;
- geringe Flexibilität des bestehenden Systems.

Chancen:

- intelligente Systemlösungen und technologischer Wandel insb. auf Kläranlagen und ihren Komponenten mit Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz;

32 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

- Energiefrage gerät in den Fokus der Siedlungswasserwirtschaft.

Risiken:

- demografischer Wandel und Schrumpfung mit der Folge von sinkenden AW-Mengen (in Teilbereichen);
- gesellschaftlicher Wandel führt ebenfalls zu sinkende AW-Mengen durch Wassersparen.

### 3.2.6 Strategische Ansatzpunkte für die Abwasserentsorgung

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem Abwasser in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Auf Grund (absehbar) steigender Preise fossiler Energieträger ist die Energiefrage in den Fokus vieler Abwasserentsorgungsunternehmen geraten. Die Abwasserentsorgung als einer der größten kommunalen Energieverbraucher bietet eine Reihe technischer und konzeptioneller Ansätze zur Reduktion ihrer Ressourceninanspruchnahme bzw. Steigerung ihrer Energie-/Ressourceneffizienz. Sie kann darüber hinaus als lokaler Akteur im Zusammenhang mit der Energiewende etabliert werden (Beiträge zum lokalen, intelligenten Lastmanagement), wodurch sich eigene, wirkmächtige Dynamiken zur Anpassung/Weiterentwicklung der Infrastrukturen ergeben. Die multifunktionale Nutzung bestehender Infrastrukturen (hier der Abwasserentsorgung zur Energiegewinnung etwa in Form von Wärmerückgewinnung oder Biogaserzeugung und Speicherung) erhöht bzw. intensiviert deren Nutzung und senkt damit (rechnerisch) die Ressourceninanspruchnahme durch die technischen Infrastrukturen. [AW 1]
- Für die Abwasserentsorgung liegt eine Reihe intelligenter neuartiger Systemvarianten/Technologien vor, die in Regionen bzw. Quartieren mit wachsenden Bevölkerungszahlen zu ressourcenleichten Infrastrukturen beitragen können. Z. B. vermag semizentrales Grauwasserrecycling und Betriebswassernutzung die zentralen Netze in Wachstumsregionen partiell zu entlasten – sofern dies lokal erforderlich ist. Ferner könnte durch dezentrales Regenwassermanagement und der Kopplung grauer, grüner und blauer Infrastrukturen ein ressourcenintensiver Ausbau (Kapazitätserweiterung) von technischen Stadtentwässerungsinfrastrukturen reduziert werden. [AW 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- In Regionen mit sinkenden Abwassermengen (durch demografischen Wandel und gesellschaftlichen Wandel/Wassersparen ausgelöst) bieten die existierenden innovativen Systemvarianten neuartige und ressourcenleichte Optionen zum technologischen Umbau (ggf. mit stärker de- und semizentral ausgerichteten Netzen und Anlagen). Dieser Umbau sollte in diesen Regionen auch mit Blick auf die langfristigen Kosten (lange Abschreibungszeiträume und Kostendeckungsprinzip) sowie spätere Anpassungsfähigkeit frühzeitig und proaktiv gestaltet werden. [AW 3]
- Die formale Einordnung der Abwasserentsorgung als kommunale Pflichtaufgabe und das Kostendeckungsprinzip bieten den Rahmen für die Entwicklung neuer ggf. auch differenzierter Kosten- und Entgeltmodelle für intelligente, flexible Infrastrukturen. [AW 4]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Aufgrund der kleinteiligen Organisationsstruktur der Abwasserwirtschaft und den in kleinen Aufgabenträgern eher begrenzten Kompetenzen zur (strategischen) Planung innovativer multifunktionaler Wasserinfrastrukturen liegt ein strategischer Ansatzpunkt darin, die Wissensbasis im Sektor etwa durch Kooperationsmodelle (z. B. Zweckverbände, gemeinsame Tochterunternehmen, o.ä.) zu stärken und Anreize für Innovationen zu fördern. Die technologische und institutionelle Dynamik im Energiesektor sowie die in der Abwasserwirtschaft in den Fokus geratene Energiefrage könnten hier ggf. Beispiele und Anreize für strukturell-organisatorische Anpassungen bieten. [AW 5]
- Das bestehende System ist nur bedingt in der Lage, flexibel auf sich rasch ändernde Lasten zu reagieren, sofern nicht etwa große Rückhaltebecken vorgehalten werden. Durch den traditionellen Ausbau der langlebigen technischen Wasserinfrastrukturen werden Pfadabhängigkeiten fortgeschrieben bzw. neu gelegt. In der Diskussion befindliche neuartige und oftmals de- bzw. semizentrale Systemvarianten können in bestimmten räumlichen Kontexten Möglichkeiten bieten, mehr Flexibilität im System zu erreichen und ggf. Pfadabhängigkeiten nicht in dem heute üblichen bzw. bekannten Maße aufzubauen. [AW 6]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen-Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Der hohe Fixkostenanteil in Kombination mit langen Abschreibungszeiträumen/ Lebensdauern und geringer Flexibilität im System erschwert eine Reaktion auf die Herausforderungen sinkender Abwassermengen in den demografischen Schrumpfungsregionen und durch Wassersparmaßnahmen. Hier gilt es, intelligente, flexible ortsangepasste Systemlösungen als Antwort auf die Herausforderungen zu entwickeln. Dazu können u.a. neue Entgeltmodelle (z. B. fixkostenbasiert mit höherem Grundgebührenanteil) implementiert werden, die verbrauchsunabhängig das System hinreichend finanzieren. Damit ergäben sich auch Spielräume für die Einführung differenzierter de-, semi- oder zentraler Systemvarianten intelligenter Infrastrukturen. [AW 7]

## 3.3 Verkehrsinfrastruktur

### 3.3.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends

Seit der Verabschiedung des Klimaschutzplans 2050 hat sich die Bundesregierung zu verkehrsbezogenen Klimaschutzzielen verpflichtet. Die verkehrsbezogenen $CO_2$-Emissionen sollen bis 2030 mindestens um 40 % gegenüber 1990 sinken. Außerdem gibt es verkehrsbezogene Energieeinsparungsziele der Bunderegierung aus dem Jahr 2010: -10 % bis 2020 und -40 % bis 2050 in Bezug auf 2005.[33] Auch nennt die Europäische Kommission im Weißbuch Verkehr[34] Ziele für die Reduktion von Treibhausgasen aus dem Verkehrssektor gegenüber 2008 von 20 % bis 2030 bzw. 70 % bis 2050. Als mögliche Schritte zur Zielerreichung bis 2050 werden unter anderem der Verzicht auf konventionelle Fahrzeuge in Städten, eine nahezu $CO_2$-freie Innenstadtlogistik, ein Anteil von 40 % $CO_2$-emissionsarmen Flugkraftstoffen und Bunkerölen sowie die Verlagerung von 50 % des Straßengüterverkehrs auf Eisenbahn- und Schiffsverkehr genannt. Im jüngsten Klimaschutzprogramm werden als Maßnahmen die stärkere Verbreitung elektrischer Fahrzeuge und die Förderung des Radverkehrs im Personenverkehr

33 Siehe hierzu: https://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.html

34 Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, Brüssel den 28.03.2011.

sowie die Nutzung von Lastenfahrrädern und die Stärkung regionaler Produktions- und Konsumstrukturen genannt.

Diesen ambitionierten Zielen steht bezüglich der Nutzung der Infrastruktur der Trend eines **steigenden Verkehrsaufwandes** gegenüber. Für den Güterverkehr wird in der aktuellen Verkehrsverflechtungsprognose bis 2030 für Deutschland von einem Wachstum von 39 % auf der Straße, 43 % auf der Schiene und 23 % in der Binnenschifffahrt ausgegangen. Das prognostizierte Wachstum des Verkehrsaufwandes im Personenverkehr fällt mit insgesamt 12 % etwas moderater aus. Dabei tragen der Luft- und Schienenverkehr mit +65 % bzw. +19 % einen überproportionalen Anteil bei.

- Aktuell kann z. B. aufgrund von Güterstruktureffekten der Trend beobachtet werden, dass aufgrund steigender Transportweite auch bei gleichbleibendem Verkehrsaufkommen der Verkehrsaufwand steigt. Die zunehmende vertikale und horizontale Arbeitsteilung, das heißt z. B. die Aufteilung der einzelnen Produktionsschritte zwischen mehreren Unternehmen auf der gleichen oder unterschiedlichen Stufen der Produktions- und Wertschöpfungskette, induziert stärkere, mit größeren Distanzen verbundene Verkehrsverflechtung. Die Verringerung von Fertigungstiefen setzt mehr Transport von Bauteilen und -gruppen voraus. Letztlich führt auch die Nachfrage nach flexiblen Lieferungen zu kleinteiligeren Sendungen und dem Einsatz von kleineren Fahrzeugen (Straßengüterverkehr) und geringeren Auslastungen. Auch der weiter zunehmende Onlinehandel führt zu Verringerung der Bestellgröße, größeren Transportweiten und zur Erhöhung der Lieferfrequenz im Vergleich zum Zulieferverkehr des stationären Handels. Demzufolge verändert sich auch die Struktur der Endkundenbelieferung in einem ähnlichen Maß wie die im Herstellungsprozess.
- Die Auswirkungen des durch den demografischen und siedlungsstrukturellen Wandel veränderten Verkehrsaufwand können lokal sehr unterschiedlich ausfallen. In wachsenden Regionen kann eine Zunahme des Verkehrsaufwandes zu Engpässen führen, wohingegen in Regionen mit abnehmenden Bevölkerungszahlen die Auslastung von Infrastruktur und öffentlichen Verkehrsmitteln zurückgehen kann. Der Rückgang des Schülerverkehrs als Rückgrat ländlicher Verkehrsunternehmen führt zu einer Gefährdung des ÖPNV in diesen Gebieten. Daneben bringt der demografische Wandel auch zusätzliche Anforderungen an die Barrierefreiheit mit sich. Insbesondere die Finanzierung und der Unterhalt der Schieneninfrastruktur sowie die Bereitstellung von Transportdienstleistungen im ländlichen Schienenverkehr stehen vor diesem Hintergrund vor einer großen Herausforderung.
- In den vergangenen Jahren konnten Trends hinsichtlich eines veränderten Verkehrsverhaltens insbesondere in urbanen Regionen beobachtet werden. Der Pkw-Besitz hat hier an Attraktivität verloren, zunehmend werden intermodale Angebote und neue Formen des Carsharing wahrgenommen. Möglich wird dies insbesondere durch die bessere Vernetzung der Nutzer mit der zunehmenden Digitalisierung. Ein weiterer Trend hinsichtlich des Verkehrsverhaltens, die verstärkte Nutzung von Fernbussen, wurde durch die Öffnung des Marktes im Jahr 2013 ermöglicht.

An die verbreiteten Diskurse zu „Nachhaltiger Entwicklung“ und Sensibilität für Klima- und Umweltschutzfragen lassen sich sowohl spezifische Trends hinsichtlich der Regulierung als auch in der **Technologieentwicklung**, etwa in der Fahrzeugentwicklung, anknüpfen.

- Die Reduzierung von Luftschadstoffemissionen hat die technologische Entwicklung im Straßenverkehr in den vergangenen Dekaden geprägt. Die schrittweise verschärften Grenzwerte auf Fahrzeugebene und die Einführung von Umweltzonen haben für neue Komponenten wie z. B. Partikelfilter oder der SCR-Technologie (Selektive Katalytische Reduktion) geführt. Für andere Verkehrsträger wie die Schifffahrt werden neue Anforderungen in den nächsten Jahren eingeführt. Dies macht neue Kraftstoffqualitäten (entschwefelte Bunkeröle; Liquid Natural

Gas) notwendig, wodurch sich direkte Auswirkungen auf den Energiesektor und -infrastruktur ergeben.

- Der Trend hin zum Klimaschutz zeigt sich bei den Verkehrsträgern auf verschiedene Weise. Während im Straßenverkehr neben der zunehmenden Beimischung von Biokraftstoffen im Wesentlichen auf eine Effizienzverbesserung der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge durch zunehmend ambitioniertere $CO_2$-Flottengrenzwerte gesetzt wird, steht eine vergleichbare Regulierung für schwere Nutzfahrzeuge noch aus. Dafür müssen kurzfristig erst einmal die Voraussetzungen geschaffen werden: Die EU-Kommission beabsichtigte, in 2015 Legislativvorschläge vorzulegen, die die Zertifizierung, Mitteilung und Überwachung der $CO_2$-Emissionen neuer, schwerer Nutzfahrzeuge vorschreiben. Nach Inkrafttreten entsprechender Vorschriften können weitere Maßnahmen wie z. B. Flottengrenzwerte oder Mautspreizung geprüft werden. Der Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr soll durch Effizienzsteigerung, alternative Energieträger (Biokraftstoffe oder PtL) und marktbasierte Instrumente umgesetzt werden. Für den innereuropäischen Luftverkehr ist Letztgenanntes mit der Einbindung in den Emissionshandel bereits realisiert und hängt damit von der Effektivität dessen ab.
- Neben dem Klimaschutz führt auch die Verknappung fossiler Rohstoffe zu dem heute beobachteten Trend, alternative Antriebskonzepte, insbesondere die Elektrifizierung im Straßenverkehr, verstärkt zu entwickeln und zu erproben. Dadurch ergeben sich aber auch neue Anforderungen an den Einsatz von Materialien (z. B. für Batterien).
- Sowohl für die Fahrzeuge als auch für die Verkehrsinfrastruktur ergeben sich aus dem Trend zu einem verbesserten Schutz vor Lärm deutliche Auswirkungen (z. B. Flüsterbremsen bei der Bahn, Lärmschutzbauwerke). Auch ergeben sich dadurch Hemmnisse bei der Umsetzung von neuen Infrastrukturvorhaben, wie beispielsweise zusätzliche Start- und Landebahnen, siedlungsnahe Schnellstraßen oder für die Nutzung der Infrastruktur (z. B. Nachtflugverbot).
- Weitere technologische Trends ermöglichen u.a. eine fortschreitende Digitalisierung und können erhebliche Auswirkungen auf die Ressourceninanspruchnahme der Verkehrsinfrastruktur haben. Aktuelle Trends finden sich bspw. in intelligenten Verkehrsnetzen und Steuerung, neuen Mobilitätsoptionen (z. B. Free Floating Carsharing, E-Ticketing, multimodale Echtzeit-Vergleiche) und Autonomem Fahren.

Auf Seiten der Verkehrsinfrastruktur können folgende **Trends** beobachtet werden:

- Die Verschlechterung des Zustands der Verkehrsinfrastruktur wird bei den Brücken im Straßen- und Schienennetz deutlich. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen einen hohen Bedarf an Ersatzneubauten im Bestand (Arndt 2013; Daehre 2012).[35]
- Netzentwicklung: Trotz der oftmals geäußerten Ziele der Verkehrsverlagerung auf die Schiene war in den letzten Dekaden ein deutlicher Rückgang der Zahl von Gleisanschlüssen zu beobachten.[36] Auch die Stilllegung von Nebenstrecken führt zu einer Abnahme der Länge des Schienennetzes in Deutschland. Seit der Bahnreform im Jahr 1994 wurde das Netz um über 6.000 km verkleinert[37] und ca. 800 Zugangsstellen für den Personen- als auch Güterverkehr geschlossen.[38] Im gleichen Zeitraum nahm die Länge des Autobahnnetzes um rund 1.700 km zu. Eine konsequente Verbesserung und Erneuerung der Signaltechnik, womit die Trassenkapazitäten erhöht werden könnten, ist nicht absehbar.

35 Siehe u.a.: http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-09/deutsche-bahn-bruecken-zustand

36 http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/337015/

37 http://www.allianz-pro-schiene.de/verkehrspolitik/infrastruktur/

38 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Fragen zur Stilllegung/Schließung von Bahnhöfen, zur durchschnittlichen Entfernung zu Bahnhöfen sowie zur Einstellung des InterRegio-Betriebs. WD 5 – 3000 – 112/2008.

- Die Infrastruktur der Seehäfen ist konfrontiert mit einem Wachstum des Güterverkehrsaufkommens und immer größeren Containerschiffen, wobei die Finanzierungssituation der Wasserstraßen von diesem Wachstum nicht profitiert. So wird die Transportkapazität der Binnenwasserstraßen begrenzt durch die Durchlasskapazität der Schleusen.
- Sich verändernde Verfügbarkeit, Qualität und Ansprüche an Baustoffe: Einerseits führt die immer bessere Raffination von Erdöl zu einer schlechteren Bindefähigkeit des Nebenprodukts Bitumen, dem Grundstoff für den Großteil der heutigen Straßen. Andererseits ergibt sich ein erhöhter Anspruch an die Materialien durch sich ändernde Wetterverhältnisse im Rahmen des Klimawandels (z. B. Beton-Blow Up), welcher beim Bau der Straßeninfrastruktur Berücksichtigung finden muss. Durch die erdölabhängige Verfügbarkeit des Bitumens ist vor allem für den Straßenverkehr eine absehbare Verknappung dieses Bindemittels aus primären Quellen abzusehen.

Neben den aufgeführten baulich-infrastrukturellen Trends können folgende **ökonomische Trends** beobachtet bzw. erwartet werden:

- Rückläufige Infrastrukturfinanzierung durch den Bund im Verkehrssektor. Auch auf Länder- und Kommunalebene (Auslaufen des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz – GVFG EntflechtungsG[39] zur Unterstützung der kommunalen Baulastträger) ist ein Rückgang der verfügbaren Mittel zu erwarten, wenn die „Schuldenbremse“ umgesetzt wird.
- Aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes der Verkehrsinfrastruktur kann für die Zukunft eine Verschiebung der finanziellen Mittel von Neu- und Ausbau auf die Erhaltung erwartet werden.[40]
- Aufgrund der Verknappung fossiler Rohstoffe ist eine Preissteigerung bei Bauleistungen absehbar (Bautätigkeiten, Bitumenpreises). Auch der Betrieb der Infrastrukturen wird sich durch steigende Energiekosten verteuern.
- Ein Trend zur Internalisierung externer Kosten ist in vielen Bereichen angestrebt, mit der Anpassung der Wegekostenrichtlinie wurde dafür im Jahr 2011 der rechtliche Rahmen für den Straßengüterverkehr gelegt. Für den Straßenverkehr ist einer der direktesten Wege die Erhebung einer nutzungsgebundenen Maut, wie sie derzeit bei den Lkw auf Autobahnen erhoben werden und für (ausländische) Pkw diskutiert wird. Der Luftverkehr bedient sich hier ähnlicher Mittel, indem die Flughafenbetreiber für die Nutzung der Infrastrukturen von den Fluggesellschaften eine Gebühr verlangen. Auch bei der Schiene sind Trassengebühren üblich.

### 3.3.2 Optionen zur Anpassung der Verkehrsinfrastruktur

Die Optionen zur ressourcenleichten Gestaltung der Verkehrsinfrastrukturen werden der Übersicht halber in vier Bereiche strukturiert. *Bauliche und planerische Aspekte* beinhalten Optionen welche keinen Einfluss auf das Nutzungsverhalten nehmen, sondern nur die Infrastrukturen bzw. die Planung dieser betreffen. Die verbleibenden Bereiche befassen sich mit Optionen zur direkten oder indirekten Beeinflussung der Nutzung:

- *Verkehrsvermeidung* umfasst alle Maßnahmen, welche lokal, regional oder national zu einem Rückgang des Verkehrsaufkommens bzw. durch Verkürzung der Wege zu einer Verringerung des Verkehrsaufwandes führen.

39 Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) und Gesetz zur Entflechtung von Gemeinschaftsaufgaben und Finanzhilfen (Entflechtungsgesetz – EntflechtG)

40 Siehe z. B. Verkehrsinvestitionsbericht Berichtsjahr 2012

- *Änderung des Modal-Splits* führt Maßnahmen auf, welche den Verkehr auf „ressourcenleichtere“, energieeffizientere oder umweltfreundlichere Verkehrsträger verlagern.
- *Optimierung* beinhaltet alle Maßnahmen, welche die Nutzung eines Verkehrsträgers auf den gegeben Infrastrukturen effizienter gestalten bzw. aus Sicht der Ressourceninanspruchnahme zu einer Reduktion bei der Nutzung führen.

#### 3.3.2.1 Bauliche, planerische Aspekte

Ein angepasster Ausbau der Infrastrukturen mit Komponenten und Baustoffen, die in ihrer Herstellung und Verarbeitung vergleichsweise wenig Rohstoffe und Energie benötigen (z. B. Bau einer Holzbrücke mit punktuell eingesetzten tragenden/verstärkenden Beton oder Metallelementen) oder aber die Verwendung besonders langlebiger, robuster Materialien/Materialgemische kann zu einer Reduktion der gesamten natürlichen Ressourceninanspruchnahme führen. Auch nachfrageflexible Bauweisen verringern die Ressourceninanspruchnahme.

Eine (weitere) Erhöhung der Recyclingquote senkt den Bedarf von Primärrohstoffen und somit unmittelbar die Beanspruchung natürlicher Ressourcen. Auch wenn die Recyclingquote für Asphalt in Deutschland mit rund 80 % weit über dem europäischen Schnitt liegt, gibt es in diesem Sektor noch großes Potential zur Erhöhung des Recyclinganteils. Durch Vermeidung des gängigen Hocheinbaus bei der Straßenkörpersanierung, wären z. B. wesentlich mehr als die derzeit 12 Mio. Tonnen Straßenaufbruch verfügbar. Somit kann in Verbindung mit den jetzt schon hohen Recyclingquoten und der verfügbaren Technik mehr Primärrohstoffe substituiert werden. Auch eine Anpassung der „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO) kann den Einsatz von Recyclingmaterial begünstigen, fördern oder sogar vorschreiben. Für andere Materialien, zum Beispiel Beton oder Steine und Erden, ist auch in Deutschland noch erheblicher Nachholbedarf bezüglich des Recyclings festzustellen.

Ein weiterer Aspekt ist der Wandel des Paradigmas in der Verkehrsplanung von einem intensiven Aus- und Neubau hin zu Sicherstellung der Mobilität. Dies bedeutet die jetzt schon durch eine unzureichende Bestandspflege entstehenden Schäden (Grömling 2014) zu minimieren und zukünftig auszumerzen und das prognostizierte Ansteigen des Verkehrsaufwandes durch intelligentes Verkehrsmanagement zu bewältigen. Auch erhöhte Verkehrsabgaben, die Internalisierung externer Kosten und eine gerechte Nutznießerfinanzierung können dabei helfen.

Aufgrund der nötigen Ausbaumaßnahmen der Energieinfrastrukturen, kann eine gemeinsame Planung und somit Kopplung des Ausbaus von Stromnetzen und Verkehrsinfrastrukturen Synergien ergeben, welche die gesamte Ressourceninanspruchnahme reduzieren (Bspw. Netzausbau, Nutzung von Banketten für Erzeugung von Solarstrom).

#### 3.3.2.2 Verkehrsvermeidung

- Der direkteste Weg, Verkehr zu vermeiden, besteht durch Regulierung und Ordnungsrecht: Lokal durch die Ausweisung von Umweltzonen und Innenstädte mit emissionsfreiem Verkehr; übergeordnet könnten konkrete Fahrverbote für Flottenbestandteile, begrenzte Fahrzeugzulassungen oder eine Erhöhung der Energiesteuer zur Verkehrsvermeidung beitragen.
- Verkehrsminimierende Siedlungsstrukturen[41] und Stärkung regionaler Wirtschaftskreisläufe[42], um auch dem wachsenden Güterverkehrsaufkommen entgegen zu wirken.

41 Gies et al. 2011: Leitkonzept – Stadt und Region der kurzen Wege. Gutachten im Kontext der Biodiversitätsstrategie, UBA-Texte | 48/2011.

42 Arndt 2010: Optimierungspotenziale im Wirtschaftsverkehr durch bestellerseitige Kooperation, Berlin 2010

- Die rasant fortschreitende Digitalisierung führt dazu, Mobilität auch virtuell zu ermöglichen. Durch z. B. Telearbeit, Homeoffice, digitale Behörden„gänge“ kann der Bedarf der physischen Mobilität ersetzt und Verkehr vermieden werden.
- In vielen Bewertungsverfahren für Infrastrukturinvestitionen werden sogenannte Reisezeitvorteile bzw. die Einsparung von Reisezeitkosten (sprich die Verkürzung der Reisezeit) als wichtiges Bewertungskriterium herangezogen. Die Wissenschaft hat seit Langem nach gewiesen, dass aufgrund des relativ konstanten Reisebudget entstehen langfristig keine Reisezeitvorteile sondern distanzintensivere Siedlungsstrukturen[43]. Aus diesem Grund sollten Ressourcenschutz und die Förderung nachhaltiger Mobilität bei Infrastrukturmaßnahmen im Vordergrund stehen.
- Eine Priorisierung von Ressourcenschutz und nachhaltiger Mobilität anstatt der Einsparung von Reisezeitkosten und demzufolge eine Entschleunigung des Verkehrs führt über die Theorie der konstanten Reisezeitbudgets zwangsläufig zu einer Reduktion des persönlichen Verkehrsaufwandes.

#### 3.3.2.3 Optimierung und bessere Nutzung der Verkehrsträger

- Die Stärkung von und somit ein induzierter Umstieg auf alternative, ressourcenleichte Energieträger wie z. B. Strom oder Power-to-Gas/Liquid, können perspektivisch zu insgesamt weniger Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen führen.[44]
- Flexible Mobilitätsangebote bieten die Möglichkeit, eine effizientere Nutzung der Fahrzeuge zu erreichen. Bei gleichbleibendem Verkehrsaufwand (Personenkilometer) führt eine Erhöhung der Auslastung zu einer Reduzierung der Fahrleistung (Fahrzeugkilometer) und damit zu Entlastung der Infrastruktur. Hierzu zählen neue Mobilitäts-Angebote wie Carsharing, Ridesharing, oder Rideselling[45], flexible Angebotsformen im ÖPNV (Mischung öffentlich, privat) und stärkere Koppelung verschiedener Verkehrszwecke auf einer Fahrt (z. B. Warenmitnahme bei Bussen, Modell Kombibus). Durch die zunehmende Digitalisierung kann der Zugriff auf flexible Dienstleistungen erleichtert werden, wenn Informationen in Echtzeit digital zur Verfügung gestellt werden.
- Autonomes Fahren als Revolution im Fahrbetrieb auch unabhängig vom Verkehrsträger kann auf mehreren Ebenen Potentiale freilegen. Auf individueller Ebene wird eine äußert effiziente Fahrzeugnutzung sichergestellt, da die Fahrzeuge unabhängig von persönlichen Qualifizierungen und Kenntnissen im Betriebsoptimum gefahren werden können. Mithilfe übergeordneter, intelligenter Verkehrslenkung kann die Kapazität der Infrastrukturen erhöht werden. Außerdem kann durch voll-autonome Elektro-Kleinfahrzeuge (reines Carsharing) mit zentralen Tiefgaragen im öffentlichen Raum ein erhebliches Einsparungspotential des Pkw-Bestandes (bis zu 50 % innerstädtisch) erreicht werden und eine Umwidmung von Park- und Verkehrsflächen stattfinden.
- Unter dem Begriff City-Logistik werden Maßnahmen zusammengefasst, welche Optionen zur Optimierung des Güterverkehrs in (vor allem in weiter wachsenden) Ballungszentren darstellen. Eine wesentliche Maßnahme ist hier die Bündelung des Wirtschaftsverkehrs und die Schaf-

43 S. u.a.: Eine statische Mobilitätskenngröße: Die jährliche Unterwegszeit pro Person – Grafik: Metz, D. (2008) The Myth of Travel Time Saving, Transport Reviews, 28 (3) 321-336; Institut für Verkehrswesen Institut für Verkehrswesen (Herausgeber): Mobiles Leben: Festschrift für Prof. Dr. -Ing. Dirk Zumkeller, 2009, S. 111; Gilles Duranton, Matthew A. Turner: The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US cities, NBER Working Paper No. 15376, 2009

44 Vgl. hierzu auch die Ausführungen zu Power-to-Gas/Liquid im Energiesektor.

45 Ridesharing bezeichnet das organisierte Bilden von Fahrgemeinschaften mit einem privaten Pkw. Rideselling ist ein Angebot ähnlich einem Fahr- oder Taxiservice. Der wesentliche Unterschied der beiden Arten besteht darin, dass die Fahrt der dienstleistungsanbietenden Seite beim Ridesharing auch ohne dritte Personen stattfindet, die Fahrt beim Rideselling aber dediziert auf Interesse der nachfragenden Seite beruht.

fung anbieteroffener Konsolidierungspunkte ähnlich dem Hub & Spoke System der Post und somit auch die Möglichkeit für nachfrageflexible Routengestaltung innerhalb der Stadt. Mit dem starken prognostizierten Wachstum des E-Commerce entstehen auch hier Optionen zur Optimierung der Logistikprozesse. Durch Bündelung auf Verbraucherebene (z. B. Lieferboxen, Direktbelieferung an Packstation oder Paketshops) lassen sich in der Logistikkette der KEP-Dienstleister bis zu 30 % der Gesamtaufwendungen im Lieferprozess einsparen.[46]

- Durch intelligente Straßensysteme und zielgerichtete Verkehrssteuerung kann eine Verbesserung des Verkehrsflusses und damit einhergehend eine Erhöhung der Kapazitäten der bestehenden Infrastrukturen erreicht werden. Dies führt zu effizienterer Nutzung der Infrastrukturen, weniger Neu- und Ausbaubedarf und somit zu verminderter Ressourceninanspruchnahme auf Seite der Infrastruktur. In der Praxis führte dies jedoch bislang in der Regel zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen (Rebound-Effekt).
- Eine Beschränkung der Höchstgeschwindigkeiten oder auch Entschleunigung des Verkehrs führt durch homogeneren Verkehrsfluss zu einer Erhöhung der Kapazitäten der aktuellen Infrastrukturen vor allem auf Straßen und demzufolge zu einer Reduktion des Flächen- und Materialverbrauchs. Aber auch die Abnutzung der Verkehrswege wird verringert. Gleichzeitig werden die Fahrzeuge gerade im Überlandverkehr auf einem effizienteren Betriebspunkt gefahren und somit auch der Energieverbrauch reduziert.

#### 3.3.2.4 Modal-Split Änderung

- Ein verstärkter intermodaler Verkehr kann die jeweiligen Stärken und Schwächen verschiedener Verkehrsträger kompensieren und somit nachhaltigen und effizienten Verkehr attraktiver machen. Hauptstrecken können so z. B. im öffentlichen Verkehr gebündelt werden, wobei Vor- und Nachlauf mit Fahrrad, e-MIV oder einem gut ausgeprägten ÖPNV Netz bewältigt werden. Es werden attraktive und kostengünstige Alternativen zu MIV oder Luftfahrt geschaffen, welche vor allem die geforderte Flexibilität mitbringen. Die individuelle Digitalisierung (mobiles Internet) bietet die Grundlage aber auch die Voraussetzung für flexible und spontane Mobilität.
- Eine Stärkung bzw. Förderung von und dadurch induzierten Umstieg auf ÖPNV stellt gerade für die wachsenden Herausforderungen im urbanen Raum, aber auch als Alternative in ländlichen Regionen eine relevante Option zur ressourcenleichten Mobilität dar. Möglichkeiten sind regionaler Nulltarif-ÖPNV, steuerliche Begünstigung, stärkere Subventionen im Neu- und Ausbau, Echtzeitinformationen/Anschlusssicherung per Smartphone, aber auch die Flexibilisierung des liniengebundenen Verkehrs in urbanen Räumen.
- Die Förderung des Fahrradverkehrs als effizientestes und ressourcenleichtes Verkehrsmittel kann im urbanen Raum zu starken Entlastungen der Infrastrukturen aber auch der zur Verringerung der Schadstoff- und Lärmbelastung führen. Voraussetzung dafür ist eine fahrradfreundlich ausgestaltete Infrastruktur, um Gefahren bei der Verkehrsteilnahme zu minimieren und Wege attraktiv zu gestalten.
- Der kombinierte Verkehr, also intermodaler Güterverkehr, bietet die Möglichkeit die starken Belastungen der Straßeninfrastrukturen zu minimieren und ebenso eine Verlagerung des Straßengüterverkehrs auf die ressourcenleichteren Verkehrsträger Schiene und wo möglich Schiff zu gestalten. Dies erfordert den Ausbau von Güterverkehrszentren und erhöht somit vorerst die Transportkosten. Ebenso kann der kombinierte Verkehr aber von den oben beschriebenen Optimierungsmaßnahmen im Stadtverkehr profitieren, wenn anbieteroffene Konsolidierungspunkte[47] einen stärkeren Fokus in der Städteplanung erhalten.

46 Hermes 2014 – Herr Hinz Teamleiter Nachhaltigkeitsmanagement

47 Umschlagpunkte, welche unabhängig vom Logistikdienstleister genutzt werden können. So dass die innerstädtische Lieferung gebündelt und effizient stattfinden kann.

- Die nutzergerechte Anlastung externer Kosten kann über Wettbewerbseffekte zu einer Verlagerung des Verkehrs führen. Dafür müssen Steuerungsinstrumente entwickelt werden und aktuelle Verzerrungen des Marktes (z. B. Steuerbefreiung für Kraftstoffe im Luftverkehr, Mautfreiheit der Reisebusse) behoben werden. Ein aktuelles Beispiel für Folgen dieser Wettbewerbsverzerrung kann in der Konkurrenz zwischen privaten Fernbuslinien und privatem Schienenpersonenverkehr gesehen werden, welche zur Einstellung des von Veolia betriebenen InterConnex geführt hat. Gerade unter dem Aspekt des siedlungsstrukturellen Wandels, beschrieben in den allgemeinen Veränderungsprozessen, wird nutzergerechte Kostenverteilung eine noch wichtigere Rolle bei der Finanzierung der Verkehrsinfrastrukturen einnehmen.

### 3.3.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Straße“

Für die Straßeninfrastruktur wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[48]:

Stärken:

- hohe Flexibilität bestehender Komponenten;
- Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme vorhanden (Optimierung);
- Zentrale Planung für Bundesfernstraßen.

Schwächen:

- Vergleichsweise (energie-)ineffizienter Verkehrsträger;
- Dominanz fossiler Treibstoffe;
- lokale und temporäre Überlastungen der Infrastruktur;
- Verursacher gesundheitsschädigender Emissionen.

Chancen:

- Technologischer Wandel – Intelligente Verkehrsnetze, Elektroverkehr, Autonomes Fahren;
- Zunehmende Sensibilität für externe Kosten und Trend zu mehr Nachhaltigkeit;
- nutzergerechte Finanzierung.

Risiken:

- Weiter zunehmender Verkehrsaufwand;
- Demografischer Wandel;
- Klimawandel;
- Finanzielle Handlungsspielräume.

### 3.3.4 Strategische Ansatzpunkte für die Straße

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet die Straßenverkehrsinfrastruktur in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

48 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Die Möglichkeit von Anpassungen im bestehenden System wurde zuvor als eine Stärke der Straßenverkehrsinfrastruktur identifiziert. Die multifunktionale Nutzung der Straßenverkehrsinfrastruktur und damit auch die Möglichkeit zur Anpassung in der Nutzung zeigt sich besonders im Personenverkehr: Insbesondere im innerstädtischem Raum findet neben dem motorisierten Individualverkehr und dem öffentlichem Verkehr auch der Fahrradverkehr auf ihr statt. Durch verhältnismäßig einfache Anpassungen kann ein Wandel bezüglich des Mobilitätsverhaltens von der Nutzung des eigenen Pkw hin zu ressourcenleichten Verkehrsmitteln wie dem Carsharing, ÖPNV und dem Fahrrad/ Elektrofahrrad unterstützt bzw. auf diesen reagiert werden. Der zunehmende Verkehrsaufwand der Fernbusse zeigt, dass eine solche Nutzungsanpassung auch im Fernverkehr auf den Straßen des übergeordneten Verkehrs möglich ist. Dabei kann eine nutzergerechte Finanzierung helfen, Ungleichgewichte mit dem Schienenverkehr auszuräumen. Für den Güterfernverkehr bietet das dichte Straßennetz gute Anschlussmöglichkeiten an das Schienennetz, sofern zukünftig die Stilllegung von Bahnnetzanschlüssen gestoppt, die Schienenverkehrsknoten und -strecken ausgebaut und die Förderung des kombinierten Verkehrs verstärkt werden. Die Anpassungsfähigkeit in der Nutzung des Straßenverkehrs bietet demnach einen strategischen Ansatzpunkt den Verkehrsaufwand auf der gegebenen Infrastruktur ressourcenleichter zu erbringen. [Stra 1][49]
- Der technologische Wandel eröffnet Potenziale einer Kopplung zum Infrastruktursektor „Strom“ – etwa durch eine Elektrifizierung des Straßenverkehrs. Durch Verwendung von Strom aus erneuerbaren Quellen kann einerseits die Nutzung fossiler Kraftstoffe im Betrieb verringert werden und andererseits die Batteriekapazität mittels gesteuerter Ladung zur Stabilisierung der fluktuierenden Stromproduktion herangezogen werden. Der Endenergieverbrauch in der Fahrzeugnutzung lässt sich durch die direkte Nutzung von Strom erheblich reduzieren. [Stra 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Der weiter zunehmende Verkehrsaufwand wurde zuvor als Risiko für die Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichten Infrastruktur identifiziert. Vor diesem Hintergrund und der zentralen Planung des Ausbaus der Straßen des übergeordneten Verkehrs ergeben sich strategische Ansatzpunkte in der flexibleren Nutzung der gegebenen Infrastruktur. Der technologische Wandel und die zunehmende digitale Vernetzung könnten sowohl die Verkehrsmittelwahl als auch die Steuerung der Auslastung der gegebenen Infrastruktur dahingehend beeinflussen, so dass deren multi- und intermodale und effizientere Nutzung verstärkt wird. [Stra 3]
- Die Erhaltung des dichten flächendeckenden Straßennetzes und die Intensivierung der Anschlussfähigkeit an andere Verkehrsträger stellen strategische Ansatzpunkte dar, den Risiken zunehmender Häufigkeit und Intensität von Störfällen, die durch die möglichen Auswirkungen des Klimawandels verursacht werden, zu begegnen. Denn im dichten Straßennetz und der Anschlussfähigkeit an andere Verkehrsträger sind Redundanzen und Ausweichmöglichkeiten angelegt, einzelne Ausfälle im System „umgehen“ zu können. [Stra 4]

49 Die hier angegebenen Codierungen (Stra für Straße) werden im Kapitel 7 Teil C in jeweiligen Unterkapiteln zur Beschreibung der Fallstudien wieder aufgegriffen. Damit soll dem Leser die Herleitung der Fallstudien nachvollziehbar dargelegt werden.

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Der schlechte bauliche Zustand weiter Teile der Straßen und Straßenbrücken wurde zuvor als Schwäche identifiziert. Gleichzeitig eröffnen sich durch die anstehenden Ersatzneubauten und Instandhaltungsmaßnahmen Möglichkeitsfenster, Anpassungen hinsichtlich der Ausgestaltung und Ausführung vorzunehmen. Modulare und erweiterbare Bauwerke (z. B. Brücken) können bei durch veränderte Verkehrsmengen bedingte höhere oder auch geringere Beanspruchung zukünftig einfacher angepasst werden. Der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen kann darüber hinaus die Ressourcenintensität verringern. [Stra 5]
- Den negativen Effekten des Verkehrs kann durch strategischen Einsatz neuartiger Technologien begegnet werden. Der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen kann in Städten zur Verringerung der THG-, Luftschadstoff- und Lärmemissionen beitragen. Autonom fahrende Fahrzeuge können durch neuartige Formen der Nutzungsteilung (Carsharing, Ridesharing) helfen, den Fahrzeugbestand in den Städten zu reduzieren und Stellflächen für andere Arten der Nutzung erschließbar machen. Auch im Fernverkehr sind durch autonomes Fahren Optionen wie Platooning[50] von LKWs zur Effizienzsteigerung und Kapazitätserhöhung der Infrastruktur denkbar. Bei der Bewertung müssen mögliche Reboundeffekte (z. B. zusätzliche Wege durch Fahrten von Fahruntüchtigen Personen; sinkende Frachtkosten durch Effizienzsteigerung der Lkw) berücksichtigt werden. [Stra 6]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen-Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Dem Risiko von Überlastung (strukturell und kapazitär) der Straßen durch den weiter zunehmenden Verkehrsaufwand auf der Straße kann durch Strategien hin zu einer Reduzierung von Transportdistanzen, z. B. durch Verringerung der Attraktivität des Straßengüterverkehrs durch Internalisierung von externen Kosten und forcierte Verlagerung auf alternative Verkehrsträger entgegen getreten werden. [Stra 7]

### 3.3.5 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Schiene“

Für die Schienenverkehrsinfrastruktur wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[51]:

Stärken:

- Überwiegend zentrale Planung;
- 2/3 des Netzes elektrifiziert;
- Vergleichsweise energieeffizienter Verkehrsträger;
- Klimafreundlicher Verkehrsträger.

Schwächen:

50 Als Platooning wird das bilden einer Fahrzeugkolonne von Lkw mit niedrigen, automatisch geregelten Abständen bezeichnet, welches das Ziel hat Kraftstoff einzusparen und Verkehrsstaus zu verringern.

51 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

- Schlechter Zustand bei vielen Brücken und Bahnhöfen;
- Hoher Fixkostenanteil;
- Störanfälligkeit nach Abbau von Ausgleichskapazitäten;
- Teilweise fehlende Flächenerschließung.

Chancen:

- Höheres Verkehrsaufkommen in Wachstumsgebieten;
- Technologischer Wandel – intelligente Verkehrsnetze;
- Verbreitete Diskurse nachhaltiger Entwicklung.

Risiken:

- Finanzielle Handlungsspielräume;
- Weiter zunehmender Verkehrsaufwand;
- Weiterer Abbau von Kapazitätsreserven;
- Klimawandel.

### 3.3.6 Strategische Ansatzpunkte für die Schiene

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem Schiene in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Nachhaltigkeit der schienengebundenen Verkehrsträger nutzen, um das steigende Verkehrsaufkommen (vor allem in Ballungsräumen) auf die Schiene zu verlagern, unter Nutzung der Diskurse zu Nachhaltigkeit. [Sch 1]
- Neue Technologien nutzen um (auch lokal) Verkehrswachstum auf der Schiene zu ermöglichen und zu fördern. [Sch 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Planung aus einer Hand: integriert und abgestimmt reagieren und organisieren, um die Folgen durch Wetterextremereignisse zu verringern, als auch dem zunehmenden Verkehrsaufkommen zu begegnen. [Sch 3]
- Im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern kann die Bahn als energieeffizienter und nicht von Verknappung fossiler Brennstoffe betroffener Verkehrsträger eine kostengünstige Aufnahme des steigenden Verkehrsaufkommens leisten. [Sch 4]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Der vernachlässigten Instandhaltung und dem weiteren Streckenabbau sollte entgegengewirkt werden, um steigendes Verkehrsaufkommen auf dem ressourcenleichten Verkehrsträger aufnehmen zu können. Insbesondere die Knoten und überlastete Streckenabschnitte sollten ausgebaut werden. [Sch 5]
- Durch intelligente Steuerung, digitale Vernetzung und alternative Konzepte können die Flexibilität und Kapazität im System gesteigert werden. [Sch 6]
- Neue Fahrzeugtechnologien ermöglichen strombetriebene Fahrt auf nicht oder teilelektrifizierten Strecken und können den Verkehrsträger noch ressourcenleichter im Betrieb machen.

Zweisystembahnen ermöglichen das wechselseitige Nutzen von unterschiedlichen Schienensystemen und so eine Angebotsqualitätssteigerung durch bessere Bedienung direkter Verkehrsbeziehungen. [Sch 7]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Vulnerabilität des Netzes gegenüber Klimawandel und anderen Störfällen minimieren durch „Erhaltungsinitiative“ und Aufbau und Erhalt von Kapazitätsreserven minimieren Redundanzen. [Sch 8]

### 3.3.7 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Luftverkehr“

Für die Luftverkehrsinfrastruktur wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[52]:

Stärken:

- Vergleichsweise guter Erhaltungszustand der Infrastruktur und Flexibilität in der Streckenführung;
- Kostendeckung/Erträge (große Flughäfen);
- Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme (Optimierung).

Schwächen:

- Energieineffizienter und Verkehrsträger mit hohen Klima- und Luftschadstoff- sowie Lärmemissionen;
- Akzeptanzprobleme durch Lärmemissionen und lokal hohem Flächeninanspruchnahme;
- Finanzierungsdefizit kleiner Flughäfen.

Chancen:

- Technologischer Wandel – Intelligente Verkehrsnetze, großes Verbesserungspotenzial im Betrieb;
- Zunehmende Sensibilität für externe Kosten und genereller gesellschaftlicher Trend zu mehr Nachhaltigkeit führen zumindest zu effizienteren Flugzeugen.

Risiken:

- Wachstum des Verkehrsaufwands;
- Klimawandel – stärkere Belastung des Bestands und erhöhte Wahrscheinlichkeit von Wetterextremereignissen;
- Wettbewerbsverzerrung zugunsten Luftverkehr- Klima- und Umweltschädigung, Lärmbelästigung.

52 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

### 3.3.8 Strategische Ansatzpunkte für den Luftverkehr

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Die zuvor identifizierte Stärke einer zunehmenden Sensibilität für externe Kosten und ein Trend zu mehr Nachhaltigkeit in der Bevölkerung nutzen, um die verstärkte Umsetzung der Optionen zu Anpassungen von Betriebsabläufen wie dem energieeffizientem Landeanflug oder von Optimierungen im Management des Luftraums (Single-European-Sky) zur Steigerung der Energieeffizienz zu forcieren. [Lu 1]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Der vergleichsweise gute Erhaltungszustand der Infrastruktur wurde zuvor als Stärke identifiziert. Diesen guten Zustand gilt es beizubehalten, um ggf. durch eine höhere Auslastung der Infrastruktur, welche mit einer stärkeren Beanspruchung einhergeht, die Infrastrukturerweiterung auf ein minimales Maß zu reduzieren. [Lu 2]
- In der Nutzung der bei großen Flughäfen und Airlines erzielten Erträge für marktbasierte Instrumente zum Klimaschutz kann ein strategischer Ansatzpunkt gesehen werden. [Lu 3]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Vor dem Hintergrund eines zunehmenden Verkehrsaufwandes und der daraus resultierenden Notwendigkeit der Infrastrukturerweiterung bzw. Nutzungsintensivierung der gegebenen Infrastruktur liegt ein strategischer Ansatzpunkt in der Erhöhung der Akzeptanz. Dafür scheint insbesondere notwendig, die Lärmbelastung durch weitere technische Maßnahmen auf Seiten der Flugzeuge bspw. durch neue Turbinen mit höherem Nebenstrom oder elektrisch betriebenen Taxibots deutlich zu reduzieren, um Konflikte mit den Anliegern zu vermeiden. [Lu 4]
- Weitere Ansatzpunkte für eine höhere Akzeptanz ergeben sich durch das Erschließen von Effizienzpotentialen und Klimaschutzmaßnahmen. Die Abschaffung von indirekten Subventionen wie die Energiesteuerbefreiung kann dagegen die Nutzung der Luftfahrt unattraktiver machen und bei der Verkehrsmittelwahl eine Verschiebung hin zu im Betrieb ressourcenleichteren Verkehrsmitteln unterstützen. [Lu 5]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Der zuvor identifizierte Schwäche des Luftverkehrs, besonders umwelt- und klimaschädlich zu sein, hohe spezifische Energieverbräuche zu haben und damit hohe spezifischen Emissionen an Luft- und Klimaschadstoffen sowie Lärmbelästigung zu erzeugen, kann vor dem Hintergrund sich verknappender fossiler Kraftstoffe mit dem Einsatz alternativer Kraftstoffe wie bspw. Bio- oder PtL-Kraftstoffe begegnet werden. Daraus kann sich eine sinnvolle Kopplung mit dem Stromsektor ergeben, sofern die PtL-Produktion zur Stabilisierung der fluktuierenden Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen genutzt werden kann. [Lu 6]
- Ein strategischer Ansatzpunkt kann darin gesehen werden, das Risiko von Ausfällen durch Auswirkungen des Klimawandels wie bspw. durch extreme Hitzeperioden verursachte Schädigung der Start- und Landebahnen zu verringern. Zwar ist der Luftverkehr theoretisch durch ein hohes Maß an Flexibilität gekennzeichnet, da die Flugzeuge bei solchen Ereignissen auf al-

ternative Flughäfen zurückgreifen könnten. Für einen einzelnen Flughafen würden solche Ausfälle jedoch zu großen Einschränkungen führen. [Lu 7]

- Die Option der Kopplung mit anderen Verkehrsträgern wie der internationalen Seeschifffahrt kann für den Güterverkehr neue Logistikkonzepte ermöglichen, wo sinnvolle Kompromisse zwischen Transportkosten und -geschwindigkeiten erzielt werden können. [Lu 8]
- Die identifizierte Schwäche eines veränderten Mobilitätsverhaltens, d. h. die stark gestiegene Inanspruchnahme von Flugreisen, wurde im Wesentlichen durch die sog. Billigfluggesellschaften (Low-Cost-Carrier) induziert. Dieser Entwicklung kann dadurch begegnet werden, die Kosten durch Internalisierung externer Kosten und Verringerung der indirekten Subventionen der Luftfahrt und der dadurch entstehenden Wettbewerbsverzerrung zugunsten der Luftfahrt anzupassen. [Lu 9]

### 3.3.9 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Schifffahrt“

Für die Binnenschifffahrtsinfrastruktur wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[53]:

Stärken:

- Vergleichsweise (energie-)effizienter und lärmarmer Verkehrsträger;
- Schifffahrt im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern klimafreundlich;
- Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme (Optimierung).

Schwächen:

- Vergleichsweise geringes freies Ertragspotential;
- Netzerweiterung unwahrscheinlich;
- Hohe Luftschadstoffemissionen bedingt durch mangelnden Modernitätsgrad der Schiffsflotte;
- Geringe Verträglichkeit mit Auen- und Gewässerschutz.

Chancen:

- Zunehmende Sensibilität für externe Kosten;
- Trend zu mehr Nachhaltigkeit.

Risiken:

- Klimawandel;
- Fehlende Investitionen in Nebenstrecken;
- Fehlende Investitionen in Erhalt und Wiederherstellung der ökologischen Funktionalität der Wasserstraßen.

53 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

### 3.3.10 Strategische Ansatzpunkte für die Binnenschifffahrt

Die **Leitfrage** in diesem Zusammenhang lautete: Welche strategischen Ansatzpunkte bietet das Infrastrukturteilsystem Binnenschifffahrt in seiner bestehenden Form für eine ressourcenleichte Ausgestaltung?

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Die prognostizierte Steigerung der fossilen Energiepreise und der verstärkte Nachhaltigkeitsdiskurs in der Gesellschaft könnte eine Verlagerung auf den ressourcenleichten Verkehrsträger "Binnenschifffahrt" begünstigen. Werden dem Energieverbrauch, dem Erhalt und der Wiederherstellung der ökologischen Funktionalität der Wasserstraßen und Ausstoß von Treibhausgasen in Zukunft Beachtung geschenkt, so wird die Schifffahrt attraktiver und eine bessere Nutzung der Infrastrukturen kann daraus folgen. [BSch 1]
- Moderne Motoren und alternative Antriebskonzepte bieten einfache Möglichkeiten, die Binnenschifffahrt auch zukünftig klimafreundlich und noch (energie)effizienter zu betreiben. Der Umstieg auf LNG aus PtG oder elektrische Antriebe mit Batteriespeichern ist hier denkbar. [BSch 2]

Strategische Ansatzpunkte für Stärken – Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Die Binnenschifffahrt ist der Verkehrsträger, der wohl am deutlichsten von den Folgen des Klimawandels betroffen sein wird. Da die Planung und der Betrieb der Infrastrukturen zentral erfolgt und über die Auswirkungen im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS[54] geforscht werden, kann dem einheitlich und langfristig entgegengetreten werden. [BSch 3]
- Da die Verwaltung der Binnenschifffahrt in öffentlicher Hand liegt, kann die finanzielle Lage über Haushaltszuschreibungen bei Bedarf und erkannter Dringlichkeit positiv beeinflusst werden. [BSch 4]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):

- Den Schwächen des Systems sind nur begrenzt Verbindungen zu den Chancen gegenüber zu stellen. So wurden hier keine strategischen Ansatzpunkte identifiziert. [BSch 5]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen – Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Der verhältnismäßig kleine öffentliche Haushaltstitel für Binnenschifffahrt hat bereits zu einer Umstrukturierung der Verwaltung und einer Fokussierung der Instandhaltungsmaßnahmen auf die Hauptstrecken geführt. Der Klimawandel und die zu erwartenden Auswirkungen werden höhere Ansprüche an die Binnenschifffahrtsinfrastrukturen mit sich bringen. Mit geringen öffentlichen Mitteln ist fraglich, ob diesen Ansprüchen genüge getan werden kann. Hier können multimodale und flexible, ineinandergreifende Systeme einen Zusammenbruch im Störfall vermeiden. Dies gilt insbesondere für die weniger intensiv gewarteten Nebenstrecken. [BSch 6]

54 http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/WS/kliwas-abschlussbericht-des-bmvi-2015-03-12.pdf?__blob=publicationFile

- Schlechte Finanzierung kann ebenso dazu führen, dass die bestehenden Infrastrukturen Innovationen hemmen, da sich diese zu langsam zu den Ansprüchen neuer Antriebs- oder Navigationskonzepte entwickeln. [BSch 7]
- Der Ausbau des Wasserstraßennetzes ist einerseits mit erheblichen Kosten verbunden und hat andererseits auch starke Auswirkungen auf die Ökosysteme. Ein Ausbau der Wasserstraßen, um die Vernetzung zu stärken, ist daher unwahrscheinlich. [BSch 8]

## 3.4 Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (IKT)

### 3.4.1 Spezifische Veränderungsprozesse und Trends

Den **politischen Rahmen** für die Entwicklung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur in Deutschland setzt die Bundesregierung in ihrer Breitbandstrategie (BMWi 2009). Darin stellt sie Maßnahmen vor, die zu einem flächendeckenden Ausbau des Breitbandnetzes, d. h. zu einer schnellen Anbindung aller Unternehmen und Haushalte ans Internet, führen sollen. Die Zielwerte der Breitbandstrategie werden durch die Bundesregierung in der Digitalen Agenda 2014–2017 (BMWi 2014) verstetigt. Bis zum Jahr 2018 soll der Ausbau einer flächendeckenden Breitbandinfrastruktur mit einer Downloadgeschwindigkeit von mind. 50 Mbit/s gefördert werden.

Als **übergeordnete Trends** im IKT-Bereich lassen sich derzeit ausmachen (Gartner 2014):

- starkes Wachstum von Datenmengen und Datenübertragung („Big Data“);
- Auslagerung der Datenverarbeitung in Rechenzentren (Cloud-Computing);
- Zunahme mobiler Endgeräte und deren Infrastruktur;
- Digitalisierung weiter Lebensbereiche (künstliche Intelligenz, intelligente Maschinen und Haushaltsgeräte, Internet der Dinge);
- sehr schnelle technologische Weiterentwicklung (Miniaturisierung, neue Werkstoffe, Beschleunigung von Rechenleistung und Datenübertragung, Sensorik, Mensch-Maschine-Schnittstellen).

Dies hat Auswirkungen auf alle anderen Infrastrukturbereiche. Besonders ausgeprägt sind die Wechselwirkungen mit dem Energiesektor und dem Verkehrssektor.

Bezogen auf den **Energieverbrauch** und die **Energiebereitstellung** sind folgende Trends hervorzuheben:

- Mehrverbrauch an elektrischer Energie: starke Zunahme an Datenerfassung, Datenübertragung, Datenverarbeitung und Datenspeicherung sowie Ausstattungsgrad mit IKT-Geräten in Haushalten, GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) und Industrie. Trotz wachsender Effizienz, bezogen auf die jeweilige Datenmenge, sorgt das starke Wachstum für einen wachsenden Energieverbrauch (Rebound Effekt).
- Änderung der elektrischen Lastprofile: Die Auslagerung von Rechenleistung auf große Rechenzentren (z. B. für Cloud-Computing, Cloud-Storage, Web-Anwendungen) führt zu einem Anstieg an elektrischen Großverbrauchern, die kontinuierlich (d. h. über 24 Stunden pro Tag und sieben Tagen pro Woche) eine elektrische Grundlast benötigen. Aufgrund des Klimatisierungsbedarfs bei hohen Außentemperaturen wird der Energieverbrauch im Sommer höher sein als im Winter.

Hinzu kommt die fundamentale Anforderung einer unbedingt zuverlässigen (unterbrechungsfreien) Stromversorgung. Da nahezu alle Bereiche von der Aufrechterhaltung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur abhängig sind, kommt der Zuverlässigkeit der Stromversorgung eine wachsende Bedeutung zu. Wenn dies nicht seitens der Netzbetreiber sichergestellt werden kann, muss dies durch dezentrale (Not-)Stromversorgung gewährleistet werden.

### 3.4.2 Optionen zur Anpassung der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur

Die Optionen zur Anpassung der IKT-Infrastruktur zur Erhöhung der Ressourcenleichtigkeit konzentrieren sich auf die Energieeffizienz und die Ressourceninanspruchnahme.

Optionen zur Erhöhung der **Energieeffizienz**:

- In Rechenzentren bestehen Einsparpotenziale sowohl in der Informationstechnik als auch in der Gebäudetechnik. Typische Maßnahmen, den Energieverbrauch von Rechenzentren um bis zu 50 Prozent senken, sind:
    - Effizientere elektrische Energieumwandlung (Netzteile, Transformatoren, Unterbrechungsfreie Stromversorgung)
    - Höhere Auslastung der Server und Speicher (Virtualisierung, Lastmanagement)
    - Reduktion der Bereitschaftsverluste (Energieverteilung, Leerlaufmodi, Netzwerktechnik)
    - Höhere zulässige Umgebungstemperaturen, dadurch geringerer Klimatisierungsbedarf
    - Effizientere Klimatisierung (freie Kühlung, Wirkungsgrade, Raumgeometrie, neue Klimatisierungstechnologien, natürliche Kältemittel mit geringerem Treibhauspotenzial, Wärmerückgewinnung, Verlagerung der geographischen Standorte)
    - Effizientere Informationstechnik (verlustärmere Prozessoren und Speichertechnik, effizientere Technologien)
    - Effizientere Software (Energiemanagement, Datenmanagement, Redundanzabbau, Datenkompression, lastadaptive Hardwaresteuerung, intelligentes Routing)
    - In IKT-Netzen werden klassische Kupferkabel zusehends durch Glasfaser ersetzt. Diese bieten höhere Übertragungsraten bei einem verminderten Energieeinsatz.

Optionen zur Reduktion der **Ressourceninanspruchnahme**:

- IKT-Geräte haben eine kurze technische Lebensdauer von wenigen Jahren. Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme bestehen daher sowohl in der Verlängerung dieser technischen Lebensdauer als auch in der ressourcenschonenden Gestaltung der Geräte:
    - Modularer Aufbau und Erweiterbarkeit der Geräte (Updatefähigkeit)
    - Verwendung standardisierter Schnittstellen und Offenlegung von Datenübertragungsprotokollen und Software
    - Austauschbarkeit von Batterien in mobilen Geräten
    - Recyclinggerechte Konstruktion (Trennbarkeit der Materialien durch entsprechende Verbindungstechnik, Verwendung sortenreiner Metalle und Kunststoffe, Kennzeichnung, Entnehmbarkeit von Baugruppen, Schadstoffentfrachtung)
    - Aufbau von Recycling-Infrastrukturen
    - Entwicklung von Recycling-Technologien für besonders kritische Stoffe
    - Rücknahme- bzw. Rückgabeverpflichtung für IKT-Geräte
    - In den IKT-Netzen sind bislang große Mengen an Kupfer verbaut. Bei der Umrüstung auf Glasfaser können diese Kupferanteile geborgen und wieder als Rohstoff verfügbar gemacht werden.

Darüber hinaus können sich durch IKT-Dienstleistungen Optionen in bzw. Wechselwirkung zum Infrastruktursystem **Energie** ergeben:

- Flexibilisierung: Durch die Vernetzung von elektrischen Verbrauchern (z. B. Smart Homes, Smart Machines) und Energieerzeugung (z. B. Smart-Grids, Einsatzplanung von Kraftwerken) können zukünftig Verbrauch und Erzeugung flexibler aufeinander abgestimmt und dadurch effizienter werden (Vermeidung von Lastspitzen, Nutzung von Energie zu Produktionsspitzen).

Bezogen auf die Wechselwirkung zum Infrastruktursystem **Verkehr** und dessen **Verkehrsaufkommen** sind folgende Optionen hervorzuheben:

- Berufsverkehr: Durch vermehrte Computer-Arbeitsplätze und Kommunikationsmittel verringert sich die Notwendigkeit zum ortsgebundenen Arbeiten. Anstelle der Arbeit in zentralen Büros für Unternehmen können verstärkt Telearbeit bzw. Heimarbeit zum Einsatz kommen. Die Folge ist ein reduziertes Aufkommen an Berufsverkehr und eine stärkere Nutzung der Kommunikationsnetze.
- Dienstreisen: Die Zunahme der Datenübertragungsraten wirkt sich unmittelbar auf die Übertragungsqualität und Verfügbarkeit von Bild- und Tonübertragung aus. Die Möglichkeit zur Durchführung von Videokonferenzen bzw. Videotelefonie statt physischer Treffen kann die Zahl von Reisen zukünftig reduzieren.
- Einkaufsfahrten: Die Abwicklung von Einkäufen über den zunehmenden Online-Handel kann kundenseitig zur sinkenden Notwendigkeit von Einkaufsfahrten führen. Viele Dienstleistungen, die nicht an Produkte oder physische Anwesenheit gebunden sind (Beratung, Finanzdienstleistungen, Bürgerdienste, teilweise Arztbesuche) werden weniger stark in Kundendienst-Centern durchgeführt, sondern durch Internet- oder Telefondienstleistungen ersetzt. Auch dies führt zu einer Abnahme von individuellen Fahrten.
- Lieferverkehr: Durch den verstärkten Online-Handel wird es auf Seiten der Lieferdienste und Logistikunternehmen zu einer Zunahme des Lieferverkehrs führen.
- Freizeitverkehr: Die Bedeutung von virtuellen Welten und Computer-Spielen wird noch weiter zunehmen. Dadurch kann sich die Notwendigkeit zu Freizeitfahrten reduzieren, da die Freizeit vor dem Bildschirm oder anderen Sichtgeräten (z. B. 3-D-Projektionen) verbracht wird. Gemeinschaften (Interessengemeinschaften, Freundschaften, Familien) verbinden sich über Kommunikationsmittel und nicht über physische Treffen. Die Unternehmensberatung Roland Berger (Roland Berger 2011) sagt für das Jahr 2030 virtuelle Urlaubsreisen voraus, die zu Erholungszwecken unternommen werden. Auf der anderen Seite entstehen durch Internet-gestützte weltumspannende soziale Netzwerke auch weitmaschige Beziehungen, die letztlich auch eine Nachfrage nach physischen Kontakten mit sich bringen und damit Fernreisen generieren.

Der verminderte Zeitaufwand im Berufsverkehr und die höhere Flexibilität des Arbeitsorts sowie Verringerung der Einkaufsfahrten durch online-Handel können jedoch auch zu Rebound-Effekten bezogen auf das Verkehrsaufkommen führen, wenn einerseits mehr Lieferdienste unterwegs sind und die frei werdende Zeit zu mehr Freizeitfahrten verwendet wird. Statt an einem festen Arbeitsort zu arbeiten, wird auf Reisen gearbeitet. In der Summe kann dadurch das Verkehrsaufkommen insgesamt steigen. Weiterhin wirken sich hier auch alle Maßnahmen positiv aus, die zu einer Reduktion des Aufwands an Materialien/Rohstoffen, Energie- und Flächenverbrauch im Verkehrssektor führen.

Aus Sicht der Verkehrsforschung ist ein verminderter Zeitaufwand für bestimme Fahrten aber nicht zwangsweise mit einer Reduktion des gesamten individuellen Verkehrsaufwandes verbunden. Grundlage für diese Annahme ist, dass jeder Mensch über ein stabiles Reisezeitbudget verfügt, welches er mit Verkehr füllen wird (siehe z. B. Eckey/Stock 2000). Dass die genannten Maßnahmen zu einer Nettominderung des Verkehrsaufkommens oder des Verkehrsaufwandes führen, lässt sich nicht pauschal sagen.

Darüber hinaus ergeben sich Wechselwirkungen mit den Optionen im Straßen-, Schienen- und Luftverkehr.

### 3.4.3 Zentrale Ergebnisse der SWOT-Analyse „Informations- und Kommunikationstechnologien“

Für die Informations- und Kommunikationstechnologien wurden die nachfolgend dargestellten besonders relevanten Stärken und Schwächen, Chancen und Risiken gemäß der Methodik der SWOT-Analyse identifiziert. Im Ergebnis der Diskussion innerhalb des interdisziplinären Bearbeiterteams stellen sich in der Summe der wechselseitigen Querbezüge folgende Merkmale bzw. Argumente als besonders stark und strategisch relevant für die weitere Bearbeitung heraus[55]:

Stärken:

- Ausschöpfung der Effizienzpotenziale in anderen Infrastrukturbereichen (Energie, Verkehr);
- Hohe Potenziale für Energieeffizienz innerhalb des IKT-Systems;
- Schnelle Innovationszyklen (Weiterentwicklungspotenzial).

Schwächen:

- Schnelle technische Alterung der Infrastrukturen, kurze Lebensdauern;
- Bei Business as usual: Steigende Verbräuche an Materialien, Energie und Fläche.

Chancen:

- Gesellschaftlicher Wandel: Energiewende, Energieeinsparung;
- Gesellschaftlicher Wandel: Bewusstsein für Ressourcenknappheit;
- IKT-Infrastruktur ist auf der politischen Agenda (Neuer Ressortzuschnitt BMVI, Breitbandstrategie, Digitale Agenda).

Risiken:

- Verknappung strategischer Rohstoffe (u.a. Konfliktmineralien), Abhängigkeit von Rohstoffmärkten;
- Geringe finanzielle Handlungsspielräume der öffentlichen Hand;
- Abhängigkeit von zuverlässiger Stromversorgung.

### 3.4.4 Strategische Ansatzpunkte für die IKT

Ausgehend von der in der SWOT-Matrix vorgenommenen Zuordnung der Stärken und Schwächen zu den korrespondierenden Chancen und Risiken wurden folgende strategische Ansatzpunkte abgeleitet:

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Chancen (im Sinne von: Verfolgen von neuen Chancen, die gut zu den Stärken des Infrastrukturteilsystems passen):

- Durch IKT-Infrastruktur können Einsparpotenziale in allen übrigen Infrastrukturbereichen und innerhalb des IKT-Systems selbst ausgeschöpft werden. Der gesellschaftliche Wandel zu Energie- und Ressourceneffizienz sollte dahingehend genutzt werden. [IKT 1]
- Die hohe gesellschaftliche Akzeptanz von IKT kann für den Umbau zu einem ressourceneffizienteren Gesamtsystem genutzt werden. [IKT 2]

55 Sämtliche identifizierten Argumente und Merkmale der Stromversorgung, die in der SWOT-Analyse zusammengetragen wurden sind im Anhang in Form einer SWOT-Matrix dokumentiert.

Strategische Ansatzpunkte für Stärken-Risiken (im Sinne von: Stärken nutzen, um Bedrohungen abzuwenden):

- Das wachsende Bewusstsein für Energie- und Ressourceneffizienz kann dazu genutzt werden, effektive Einsparungen im IKT-Bereich zu erzielen und vom Rebound- und Business-as-usual (BAU)-Pfad abzuweichen. [IKT 3]
- Strategische Ansatzpunkte für Schwächen-Chancen (im Sinne von: Schwächen eliminieren, um neue Möglichkeiten zu nutzen):
- Der Verknappung von Rohstoffen kann durch effizientere Technologien sowie Nutzung und Weiterentwicklung von Recyclingverfahren entgegen gewirkt werden. [IKT 4]
- Neue Konzepte zur Stromerzeugung, Stromspeicherung, Lastanpassung können die Abhängigkeit von zuverlässiger zentraler Stromversorgung reduzieren. [IKT 5]
- Die örtliche Unabhängigkeit von Datenverarbeitung (Rechenzentren) kann genutzt werden, um krisen- bzw. ausfallsichere Systeme zu errichten. [IKT 6]

Strategische Ansatzpunkte für Schwächen-Risiken (im Sinne von: Verteidigungsstrategien entwickeln, um vorhandene Schwächen nicht zum Ziel von Bedrohungen werden zu lassen):

- Der Business-as-usual (BAU)-Pfad muss verlassen werden. Um Rohstoffabhängigkeit und wachsenden Energiebedarf zu reduzieren, ist eine langfristige strategische Planung des IKT-Sektors erforderlich. [IKT 7]
- Strategien zur Ressourcenleichtigkeit sind beispielsweise eine Verlängerung der Lebensdauer, Energieeffizienz, Ökodesign/modularer Aufbau, Energie- und Rohstoffsteuern, Standardisierung und besseres Recycling (technologisch und legislativ). [IKT 8]
- Die Abhängigkeit von wenigen Konzernen sollte verringert werden: Mehr eigene IKT-Forschung, eigene Produktionsstandorte, keine Auslagerung von IKT-Dienstleistungen in einzelne Länder bzw. Unternehmen. [IKT 9]

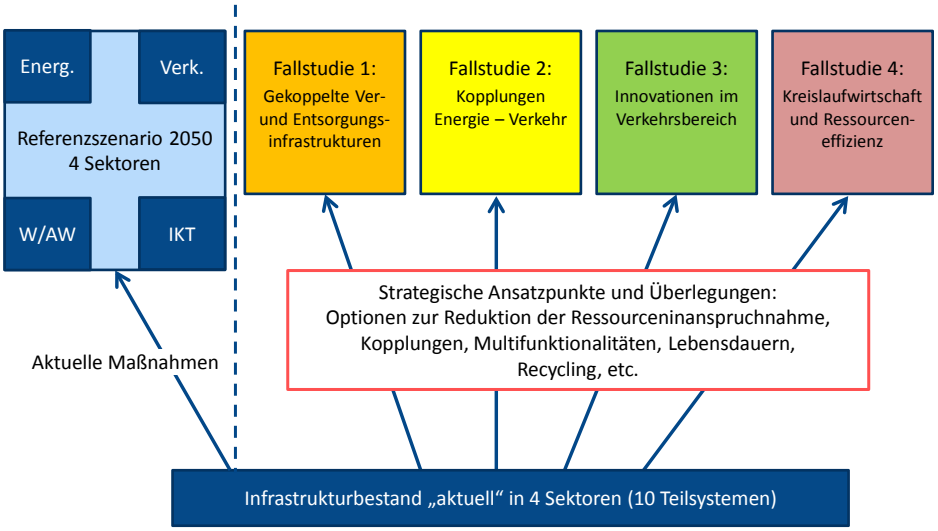
# Teil C: Szenarien

Im Folgenden werden die einzelnen Szenarien beschrieben, die ihnen zugrunde gelegten Annahmen eingeführt und die Ergebnisse der anschließenden Analysen vorgestellt. Die Analysen der Szenarien umfassen sowohl eine orientierende Stoffstromanalyse als auch Abschätzungen zu den Entwicklungen der Kosten der Infrastrukturen und qualitative Untersuchungen hinsichtlich verschiedener Gestaltungsmerkmale und Anforderungen.

Grundsätzlich wurden einem Referenzszenario vier Alternativszenarien (Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen) gegenübergestellt. Alle fünf Szenarien gehen vom selben Infrastrukturbestand in den vier Sektoren im Jahr 2012 aus. Der heute gegebene Infrastrukturbestand wird dann in den einzelnen Szenarien unter verschiedenen Annahmen und in den Szenarien abgebildeten Maßnahmen zu einem künftigen Infrastrukturbestand in den Jahren 2030 und 2050 weiter entwickelt.[56] Im Referenzszenario werden „aktuelle Maßnahmen“ aufgegriffen und abgebildet. In den Alternativszenarien werden verschiedene Ansatzpunkte und Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme in Fallstudien modelliert.

Entwicklung und das Verhältnis der Szenarien zueinander kann in der folgenden Grundstruktur abgebildet werden:

Abbildung 18 : Grundstruktur und Verhältnis der Szenarien im Vorhaben




Quelle: Difu/Öko-Institut.

56 Dazwischen liegende Jahresscheiben werden linear interpoliert.

Für die Infrastrukturbestände in den verschiedenen Jahren (2030, 2050) werden orientierende Stoffstromanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse in den folgenden Kapiteln vorgestellt werden. Dazu werden jeweils die Zahlen für die vier zentralen Bewertungsparameter der Ressourceninanspruchnahme (KRA, KEA, THG und Fläche) aufgeführt. In der Präsentation der Ergebnisse werden die Zahlen für die vier Parameter in den vier Fallstudien denen des Referenzszenarios jeweils direkt gegenübergestellt.

**Das methodische Vorgehen „kurz gefasst“**

Das Referenzszenario ist als „aktuelle Maßnahmen-Szenario“ angelegt. Das heißt:

Kein „BAU-Szenario“

Referenzszenario orientiert sich technologisch an gemäßigten Modernisierungs-/Optimierungspfaden

Referenzszenario baut auf gemeinsamen, d. h. auf für alle Infrastrukturbereiche gültigen, Metaparametern auf (Demografie, Wirtschaftsentwicklung u.a.m.)

Grundlage: Studien „Klimaschutzszenario 2050“ des Öko-Instituts und Fraunhofer ISI, hier sind Szenarien mit verschiedenen klimapolitischen Ambitionsniveaus für den Zeithorizont bis 2050 („Aktuelle-Maßnahmen-2012“,KS 80, KS 90) angelegt (vgl. Repenning et al. 2015)

Kern der zugrunde gelegten Klimaschutzszenario-Studie ist das Energiekonzept der Bundesregierung

Differenzierungen erfahren die Referenzszenarien durch sektorenspezifische Annahmen

Die Fallstudien „ressourcenleichter Infrastrukturen“ sind als Alternativszenarien im Kontrast zum Referenzszenario angelegt. Sie zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

Die in den Alternativszenarien angenommenen Metaparameter (Demografie, Wirtschaftsentwicklung u.a.m.) entsprechen denen in den Referenzszenarien.

Sie integrieren verschiedene Infrastruktursysteme und Sektoren.

Sie sind mehr als die Implementation technischer Einzeloptionen zur Optimierung.

Die den Alternativszenarien zugrunde liegenden Maßnahmensets und Strategiepakete sind so „gestrickt“, dass sie eine Ressourcenleichtigkeit vermuten lassen.

Fokussierung des Zielsystems in diesen Szenarien auf normative Ausrichtung des Vorhabens

# 1 Referenzszenario

Das Referenzszenario ist auf Annahmen zur Entwicklung des Infrastrukturbestandes in Deutschland im Jahr 2050 vor dem Hintergrund „aktuell getroffener Maßnahmen“, Planungen und Prognosen aufgebaut. Darauf aufbauend wird der mögliche Infrastrukturbestand über die vier Sektoren hinweg für die Jahre 2030 und 2050 abgeschätzt. Ausgehend von der Bestandsanalyse (Basisjahr 2012) wird eine orientierende Stoffstromanalyse für 2030 und 2050 berechnet.

Dabei stellt sich eine Reihe **methodischer Herausforderungen**, die im Weiteren beachtet werden müssen und für die versucht wurde, ein methodisch „sauberes“ Vorgehen zu entwickeln:

Grundlegendes Problem bezüglich der Szenarien ist der ferne Zeithorizont bis 2050, der mit extrem großen Unsicherheiten und Ungewissheiten behaftet ist. Es ist heute schlicht nicht absehbar, welche politischen, sozialen, ökonomischen und technologische Entwicklungen bzw. Innovationen bis zum Jahr 2050 eintreten. Allenfalls können, aber auch das nur mit großen Unsicherheiten, Korridore für Wahrscheinlichkeiten des Eintretens angegeben werden. Es lässt sich demnach nicht umgehen, dass die Annahmen der Entwicklung 2015–2030 mit mittlerer (teils hoher) Unsicherheit (je nach Sektor), die darüber hinausgehenden Annahmen zur Entwicklung 2030–2050 mit sehr hohen Unsicherheiten (insbesondere im IKT-Sektor) behaftet sind. Die Annahmen sind demnach als fundierte Schätzungen anzusehen.

Vor diesem Hintergrund wurden daher zunächst erste Abschätzungen der Bestandsentwicklung auf Basis von (nationalen) Planungen (z. B. NEP Strom und Gas und Bundesverkehrswegeplan) bis 2030 vorgenommen (die zeitlichen Horizonte der Plandokumente geben diese Informationen teilweise her) („aktuelle Maßnahmen“). Eine lineare Fortschreibung der (historischen bzw. vermuteten) Entwicklung über 2030 hinaus ist nicht in allen Sektoren und nicht für alle Teilkomponenten plausibel. Daher wurden nicht nur Teilsystem spezifische, sondern z. T. auch Netz-/Anlagen (Komponenten) bezogene Annahmen der weiteren Entwicklung des Infrastrukturbestands bis zum Jahr 2050 getroffen.

Wegen der großen Unsicherheiten sind Sensitivitätsanalysen notwendig, um die getroffenen Annahmen (fundierte Schätzungen) zu prüfen. Falls sich z. B. die Entwicklung des Stromnetzes dabei als bedeutsamer Faktor erweist, würden die Annahmen zur voraussichtlichen Entwicklung der Stromnetze entsprechend differenzierter betrachtet bzw. mit differenzierten Annahmen hinterlegt.

Damit ist das Referenzszenario

- keine Prognose über Bedarfe an Infrastrukturdienstleistungen,
- kein „dynamisches“ Szenario (etwa zur Entwicklung der Stromübertragungsnetze in Deutschland oder der benötigten Speicherkapazitäten nach Regionen), und
- es beruht nicht auf eigenen Modellierungen etwa des Kraftwerkparks.

Dies würde das Vorhaben in seinem Volumen sprengen. Daher setzt das Vorhaben das Referenzszenario auf dem Szenario „Aktuelle Maßnahmen 2012“ der Studie Klimaschutz 2050 (Repenning et al. 2015) auf und bedient sich hier nicht nur der Annahmen über die Entwicklung z. B. der Energiebedarfe, sondern auch der damit zusammenhängenden sozio-ökonomischen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung, BIP, Energiekosten etc.

## 1.1 Grundlegende Annahmen im Referenzszenario

Hinter den Annahmen der Entwicklung des Infrastrukturbestands stehen auch Annahmen über die zukünftige Entwicklung der Bedarfe an Infrastrukturdienstleistungen. Diese wurden in Teil B dieses Berichts (vgl. Kapitel Analyse von Veränderungsprozessen und Zukunftstrends) eingeführt. Sie liegen den folgenden Annahmen zugrunde.

### 1.1.1 Sektorenübergreifende Annahmen

Die folgenden Basisdaten wurden der „Klimaschutzstudie 2050“ „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario 2012“ (AMS 2012) entnommen (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014, Repenning et al. 2015):

Tabelle 2: Übersicht zur Entwicklung zentraler Rahmenparameter der Szenarien

| Jahr | Bevölkerungs-zahl in Mio. | BIP Mrd. Euro$_{2010}$ | erneuerbar erzeugter Strom TWh | Personen-verkehrsleistung Mrd. Pkm | Güter-verkehrsleistung Mrd. tkm |
|---|---|---|---|---|---|
| 2010 | 80,6 | 2.496 | 109 | 1.063 | 604 |
| 2020 | 78,8 | 2.752 | 231 | 1.074 | 700 |
| 2030 | 77,7 | 3.009 | 315 | 1.075 | 758 |
| 2040 | 76,2 | 3.209 | 364 | 1.074 | 800 |
| 2050 | 74,0 | 3.402 | 399 | 1.082 | 821 |
| **2050/2010** | **92 %** | **136 %** | **366 %** | **102 %** | **136 %** |

Quelle: Repenning et al. 2015.

Weiterhin wird angenommen, dass bis 2025 bzw. 2035 die Zahl der Haushalte leicht ansteigt; danach aber zurück geht (BBSR 2012, S. 7; BBSR 2015) und die Wohnfläche pro EW weiter ansteigt (um 5 m² bis 2030) (BBSR 2012, S. 9). Ab 2030 setzt außerdem ein verstärkter Bevölkerungsrückgang ein (Statistisches Bundesamt 2015, S. 15 ff.). Räumliche Disparitäten der demografischen Entwicklung nehmen weiter zu (BBSR 2012, BBSR 2015).

Der Zuwachs von Siedlungs- und Verkehrsfläche sinkt auf ca. 50 ha/Tag in 2030 (BBSR 2012, S. 9). Nach eigenen Annahmen sinkt dieser weiter womit ab 2040 nur noch 30 ha/Tag SuV dazu kommen. Die Straßen- und Schienenverkehrsflächen stagnieren ab 2040 (BBSR 2012, S. 9).

### 1.1.2 Sektorenspezifische Annahmen

Einerseits wird im Folgenden dokumentiert wie die Bestandszahlen der Infrastrukturen im Basisjahr und der Entwicklung bis 2030 und 2050 ermittelt wurden. Andererseits werden die jeweiligen zentralen, sektorenspezifischen Annahmen eingeführt. Die aus den Quellen und Annahmen abgeleiteten konkreten Werte zur Entwicklung der Energie-, Wasser- Verkehrs- und IKT-Netze ausgedrückt in km sowie der Anlagenbestand (Kraftwerke, Kläranlagen, Flughäfen, Server usw.) sind in der Tabelle im Anhang samt Quellen und Herleitung/Begründung ausgewiesen.

#### 1.1.2.1 Energie

Eine Grundlage bildet die folgende Übersicht über den Endenergiebedarf im Haushaltssektor.

Tabelle 3: Übersicht zur Entwicklung zentraler Rahmenparameter der Szenarien

| Energieträger | 2008 | 2020 | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | PJ | | |
| Strom | 123 | 89 | 76 | 78 | 77 |
| Erdgas | 1.029 | 969 | 912 | 791 | 653 |
| Fern-und Nahwärme | 156 | 258 | 298 | 308 | 305 |
| Heizöl | 509 | 227 | 54 | 9 | 5 |
| Kohle | 48 | 27 | 12 | 5 | 3 |
| biogene Brennstoffe | 235 | 271 | 247 | 217 | 182 |
| Umweltwärme | 12 | 25 | 40 | 64 | 77 |
| Solarthermie | 12 | 25 | 33 | 32 | 28 |
| Summe | 2.124 | 1.890 | 1.673 | 1.502 | 1.329 |
| Minderung ggü. 2008 | | -235 | -452 | -622 | -796 |
| prozentuale Minderung ggü. 2008 | | -11% | -21% | -29% | -37% |

Quelle: Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014, S. 88.

**Stromversorgung**

- Der **Kraftwerkspark** ist, sofern vorhanden, den Angaben der Bundesnetzagentur für das Jahr 2014 entnommen (BNetzA 2014). Ergänzt sind die installierte Leistung an BHKWs aus Steger et al. (2011), Abschätzungen zu den privat installierten Photovoltaik- und Solarthermieanlagen mit installierter Leistung und bei den Photovoltaikanlagen die Aufteilung zwischen Dach- und Freiflächenmontage (BSW-Solar 2014), sowie die Anzahl der Brennwertkessel (HWWI 2013). Die Entwicklung des Kraftwerksparks und somit den Erzeugungskapazitäten bis 2030 und 2050 wurde aus dem „Aktuelle-Maßnahmen-Szenario 2012“ (AMS) aus Repenning et al. (2015) übernommen.
- Die Verteilung der Längen auf die Verteilebenen der **Stromnetze** erfolgt über den Schlüssel aus Steger et al. (2011) älterer Bestandsdaten. Für die Freileitungen wurde die gesamte Netzlänge der Verteilebenen Höchst- und Hochspannung aus Statista (2015a) entnommen. Ebenso sind die Längen der Mittel- und Niederspannungsnetze Statista (2015a) entnommen. Es gilt das Bezugsjahr 2012. Die Längen der Erdkabel sowie Anzahl an Umspannwerken und Transformatoren wurden aus Steger et al. (2011) übernommen, da hierzu keine aktualisierten Daten verfügbar sind. Die Stromzähler wurden aus Statista (2015b) übernommen. Wobei die Aufteilung in normale Stromzähler und Smartmeter aus dem Roll-Out Szenario von Ernst & Young (2013) kommt. Die Entwicklung der Netzlängen entspricht dem Szenario B 2034 im NEP 2024 (BNetzA 2015). Nach 2030 wird eine lineare Fortschreibung des Ausbaus bis 2050 angenommen. Für die Umspannwerke wird unterstellt, dass diese sich proportional zum Anstieg der Netze entwickeln. Bis 2050 wird weiterhin ein kompletter Ersatz normaler Stromzähler durch Smartmeter angenommen mit einem Zwischenwert für 2030 nach dem Roll-Out Szenario.
- Die Thematik der **Stromspeicher,** sei es durch Batterie oder PtX-Umwandlungsspeicher, wird nach übereinstimmender Einschätzung der im Rahmen des Vorhabens konsultierter Experten erst ab einem EE-Anteil von über 60 % signifikant und ist damit im Referenzszenario kein systemrelevantes Thema. Die Stromspeicher finden daher keine besondere Berücksichtigung.

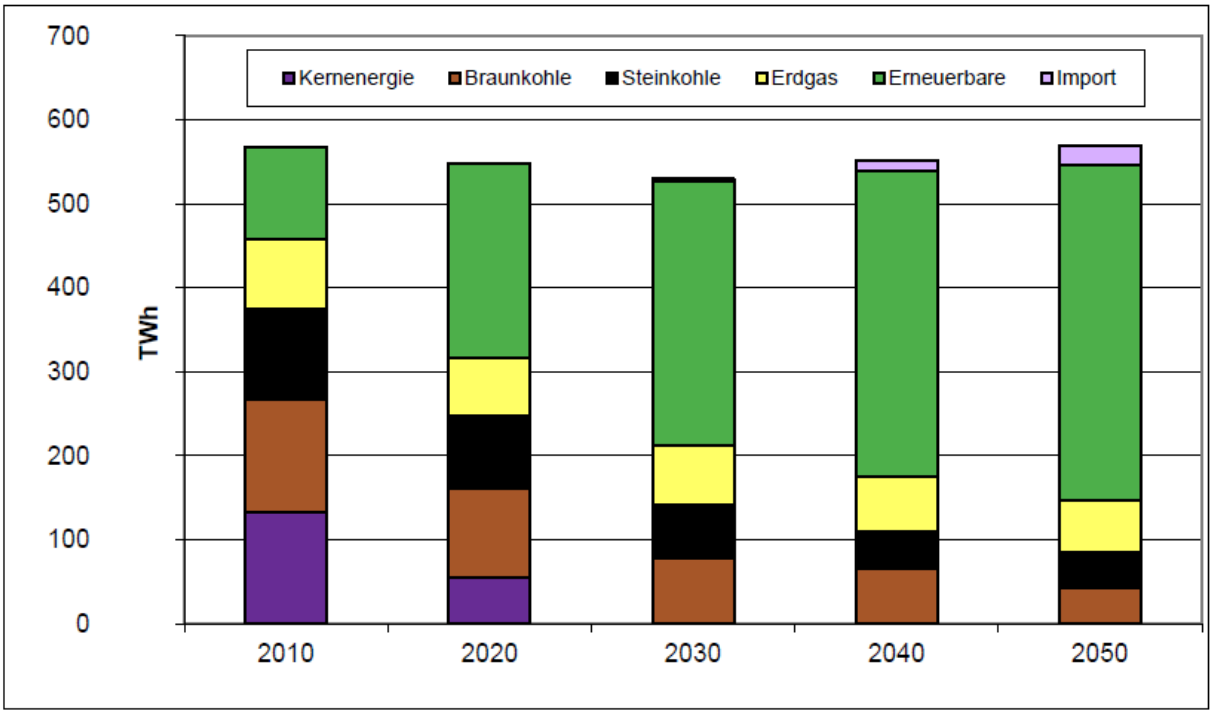
Kritische Anmerkungen: Wenn lokale und regionale Akteure im Bereich der Stromerzeugung zukünftig an Bedeutung gewinnen, wäre die vorgeschlagene lineare Fortschreibung des Stromnetzausbaus über 2030 hinaus bis 2050 nicht zwingend. Vor allem in Hinblick auf eine zunehmende Dezentralisierung der Netze kann auch von einer Verlangsamung bis Stagnation des Stromnetzausbaus bis 2050 ausgegangen werden. Dieser Aspekt ist im Vorhaben mit einer Sensitivitätsanalyse auf die Wirkmächtigkeit dieser Infrastruktur für das Ergebnis der orientierenden Stoffstromanalyse zu prüfen; ggf. sind

die Annahmen zur voraussichtlichen Entwicklung der Stromnetze entsprechend differenzierter zu betrachten bzw. mit differenzierteren Annahmen zu hinterlegen.

Die Annahme der Durchdringung des Energiesystems mit „Smartmeter“ ist mit Fragen der Sicherheit und Kritikalität der Infrastrukturen zu verknüpfen (vgl. qualitative Kriterien der Szenario-Beurteilung).

Grundsätzlich ist die Entwicklung im Energiesektor aufgrund der technischen Innovationen aber auch der regulatorischen bzw. institutionellen Anpassungen und der Veränderungen im Marktgeschehen (Wettbewerb, Geschäftsmodelle) aktuell sehr schwer einzuschätzen.

Abbildung 19: Nettostromerzeugung im Aktuelle-Maßnahmen-Szenario (2012)




Quelle: Berechnungen Öko-Institut.

**Gasversorgung**

- Die Längen der **Regional- und Ortsnetze** der Erdgasnetze sind in ihren verschiedenen Druckebenen aus BNetzA (2012) übernommen. Der Gasnetzausbau im Ortsnetz geht zurück, da die meisten (rentablen) Gebiete erschlossen sind. Eine Annäherung der gesamten Gasnetzlänge an die gesamte Abwassernetzlänge wird prognostiziert, da dieses einen Versorgungsgrad von 99 % erreicht. So wird auch hier von einer vollen Erschließung ausgegangen. Diese Entwicklung wurde ursprünglich für den Zeitraum von 2000 bis 2012 prognostiziert, zeigt sich nun aber eher realistisch bis 2030. Bei einer Gleichverteilung der Entwicklung auf die unterschiedlichen Gasnetze zur Annäherung an die Gesamtlänge des Abwassernetzes ergibt sich ein Wert von jeweils 10 %. Eine ungefähr gleichschrittige Entwicklung der Netze weist auch Statista (2015c) aus. Ab 2030 sinkt der Gasnetzausbau weiter, da Raumwärme und Warmwasser zunehmend strombasiert bereitgestellt werden und eine geringere Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche einsetzt (eigene Annahme basierend auf BBSR 2012, S. 9) und ein sinkender Gasverbrauch (vgl. FNB Gas 2015a) absehbar ist. Der Erdgaseinsatz für Endenergie im Bereich „Wohnen“ sinkt bis 2050 auf 63 % im Vergleich zum Jahr 2008 (100 %) (vgl. Klimaschutzsze-

nario-Studie AMS 2012; Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014, S. 87). Daher wird von einer geringen Steigerung der Netzlänge zwischen 2030 und 2050 ausgegangen.

- Die Länge der **Gasfernleitungsnetze** für das Bezugsjahr ist aus BNetzA (2013) übernommen. Die Verteilung der Fernleitungsnetze auf die verschiedenen Klassen erfolgte nach dem Verteilungsschlüssel aus Steger et al. (2011). Die Entwicklung des Gasfernleitungsnetzes wird entsprechend dem NEP Gas 2015 (FNB Gas 2015) bis 2025 auf 2030 extrapoliert. Für die Klassen A und B wird von einer längeren Planungsvorlaufzeit ausgegangen und somit die Ausweisungen nach BNetzA genutzt. Ab Klasse C wird der Verteilschlüssel nach Steger et al. (2011) berücksichtigt.
- Die Anzahl der unterirdischen **Gasspeicher** wurde aus BMWi (2014c) entnommen die der oberirdischen Frühschütz (2014). Zusätzlich zu den geplanten Maßnahmen zum Ausbau unterirdischer Speicher (Deutscher Bundestag 2013) wird bis 2030 ein zusätzlicher Ausbau um 20 % angenommen. Für die oberirdischen Speicher wird ein verhältnismäßig geringer Ausbau um 10 % angenommen, da die unterirdischen Speicher präferiert sind. Aus heutiger Sicht sind die unterirdischen Speichermöglichkeiten begrenzt, sodass es keine weitere Entwicklung bis 2050 gibt. Auch die oberirdischen Speicher werden bis 2050 nicht weiter ausgebaut.
- Informationen über **Gasverdichter** sind aus FNB Gas (2014) bezogen. Bis 2023 sind 10 Anlagen in Planung laut FNB Gas (2013). Bis 2030 wird der Anstieg durch das verhältnismäßig geringere Wachstum im Erdgasnetz abnehmen, sodass angenommen wird, dass die Hälfte des aktuellen Planungsstandes zusätzlich hinzukommt.

**Wärmeversorgung**

- Das **(Fern-)Wärmenetz** (Wasser und Dampf) des Bezugsjahres wird AGFW (2013) entnommen. Das Netz ist größtenteils ausgebaut und obwohl der Raumwärmebedarf abnimmt ab, gibt es derzeit Tendenzen zum weiteren Ausbau 100 km pro Jahr (UBA 2007). Der Fernwärmeabsatz wird steigen, wobei der Netzausbau bis 2030 weitestgehend abgeschlossen sein wird. Nach 2030 wird von nur sehr geringem Zubau ausgegangen (das Klimaschutzszenario „AMS 2012“ geht von nahezu konstantem Endenergiebedarf von Gebäuden auf Basis von Fernwärme zwischen 2030 und 2050 aus) (Öko-Institut/Fraunhofer ISI 2014). Ab 2030 findet nur lokal ein vereinzelter Ausbau und eine Stabilisierung der Länge durch Rückgang des Raumwärmebedarfs statt.
- Die Abschätzung der Bestandsentwicklung des **Nahwärmenetzes** liegt Steger et al. (2011) zugrunde. Nach UBA (2007) könnten sich aufgrund technischer Innovationen im Bereich de- und semizentraler Energiezeugung (Mini-/Micro-BHKW, Brennstoffzelle) semizentrale Lösungen der Wärmeversorgung (etwa auf Ebene von Gebäudeensemble) perspektivisch gegenüber der zentralen Fernwärme als attraktiver, weil kostengünstiger erweisen. Demnach wird von einer Netzerweiterung um 66 % bis 2050 ausgegangen (in der Studie schon bis 2020). Es wird angenommen, dass die Hälfte des Ausbaus bis 2030 stattgefunden hat.
- Die Länge der Kältenetze wurde ebenso aus AGFW (2013) übernommen. Durch Klimawandel und neue Techniken wird ein Ausbau angenommen, der jedoch von der technischen Entwicklung abhängt. Daher wird eine Verdopplung bis 2030 angenommen. Durch die Kopplung von KWK-Wärmenetzen mit Kälteabsorptionsanlagen ergeben sich weitere Chancen, so dass ein weiterer starker Anstieg mit nahezu Verdopplung angenommen werden kann.

#### 1.1.2.2 Wasserver- und Abwasserentsorgung

Die Menge des abgegebenen Trinkwassers der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland je Einwohner und Tag ist seit Jahren rückläufig (ATT et al. 2015). Inwiefern sich dieser Trend in der **Bedarfsentwicklung** fortsetzen wird, ist nur bedingt abzuschätzen (Schleich/Hillenbrand 2007). Wie

problematisch Bedarfsentwicklungsabschätzungen sein können, zeigt ein Blick auf frühere Prognosen, die durch die reale Entwicklung widerlegt wurden. Im Jahr 1980 wurde von der TU Berlin ein Pro-Kopf-Wasserverbrauch für Westdeutschland von durchschnittlich 219 Litern im Jahr 2000 prognostiziert. Tatsächlich lag der Verbrauch 2000 bei ca. 129 Litern (BDEW 2012).

**Wasserversorgung**

- Die Erfassung des Bestandes **von Brunnen und Quellwasserfassungen** beruht auf Zahlen des Statistischen Bundesamtes (2004). Es wird von einer Kopplung zwischen Wasserverbrauch und Wassergewinnungsanlagen ausgegangen, so dass der prognostizierte Rückgang des Wasserverbrauchs bis 2030 (Hamburg Wasser 2008) auch einen Rückgang der Gewinnungsanlagen mit sich zieht. Bis 2050 wird ein weiterer aber leichterer Rückgang angenommen.
- Bei einem Anschlussgrad von 99 % (ATT et al. 2015) findet ein Ausbau des **Trinkwassernetzes** nur bei der Neuerschließung von Siedlungsflächen statt. Daher ist die Entwicklung der Trinkwassernetzlänge an die Siedlungs- und Verkehrsflächenentwicklung gekoppelt. Bis 2030 ist demnach ein moderater Anstieg um 10 % angenommen, bis 2050 ein Anstieg um insgesamt 14 %.
- Der Bestand von **Wasserwerken** ist UBA (2014) zugrunde gelegt. Bis 2030 wird auch hier ein Rückgang prognostiziert. Er ist sowohl an die Reduktion des Wasserverbrauchs als auch an die Zentralisierung der Wasserversorgung gebunden. Der Rückgang um 8 % wird um ein Viertel gesenkt, da bereits Effizienzmaßnahmen getroffen wurden. Bis 2050 sinkt die Wasserabgabe weiter und eine Konzentration der Anlagen erfolgt extensiv.
- Bestände der **Talsperren** sind aus Steger et al. (2011) übernommen. Durch den Bedarf an Erneuerungsmaßnahmen wird das Fortbestehen einzelner Talsperren ggf. in Frage gestellt. Dies gilt für Talsperren, die der Wasserversorgung dienen. Die absolute Zahl an Talsperren wird im Zuge der Klimaanpassung (insbesondere zur Hochwasserregulierung und Energieerzeugung) zunehmen; daher hier jedoch die Annahme von 3 % Rückgang bei Talsperren, die der Wasserversorgung dienen. Bis 2050 ist ein weiterer, minimaler Rückgang anzunehmen.
- Die **Trinkwasserspeicher** des Bezugsjahres stammen ebenso von Steger et al. (2011). Zwar kommt es durch einen Rückgang des Trinkwasserbedarfs auch zu einem leichten Rückgang des Bedarfs an Trinkwasserspeichern, es wird jedoch angenommen, dass dieser nur hälftig zu einem realen Rückgang führt.

**Abwasserentsorgung**

- Die Bestände des **öffentlichen Kanalnetzes**, sowie die **Regenentlastungsanlagen** sind mit Bezugsjahr 2010 dem Statistischen Bundesamt (2010) entnommen. Die Entwicklung der Abwassernetzlänge ist zum einen durch die Entwicklung der Siedlungs- und Verkehrsfläche bestimmt, zum anderen aber auch durch den Trend zur Trennkanalisation. Für Mischkanäle wird daher von einer Stagnation auf dem Level des Bezugsjahres ausgegangen. Für Schmutz und Regenwasserkanäle wird von einem Zuwachs von 20 % bis 2030 ausgegangen. Bis 2050 kommt es durch eine Sättigung aufgrund wirtschaftlicher Belange nur noch zu einer Steigerung des Wertes von 2030 um 10 % bis 2050. Ein nahezu gleicher Verlauf ist den Regenentlastungsanlagen unterstellt, mit Ausnahme der Regenüberläufe ohne Becken, welche nicht mehr gebaut werden. Ein Rückbau von Netzen wird auch in Schrumpfungsregionen nicht angenommen. Daher werden keine Gutschriften in der Bilanzierung gegeben.
- Die Länge des **privaten Kanalnetzes** wird auf Grundlage von UBA (2015) geschätzt. Der Ausbau bis 2030 und 2050 wird proportional zur Siedlungsflächenzunahme angenommen.

- Die Zahl der **Abwasserbehandlungsanlagen** in den verschiedenen Kategorien ist dem Statistischen Bundesamt (2013) entnommen. Insgesamt ist ein leichter Rückgang der Zahl der Abwasserbehandlungsanlagen (Statistisches Bundesamt 2013)[57]. Kleine Abwasserbehandlungsanlagen werden derzeit bereits konstant zurückgebaut, viele werden jedoch durch technische Verbesserungen (Effizienz, Reinigungsleistung, Kosten) weiter betrieben. Den Abwasseranlagen der Größenklasse III wird ein höherer Rückgang im Vergleich zu den kleineren Anlagen durch Siedlungsstrukturauflösungen zugeschrieben. Da Großstädte und ihre Infrastrukturen bestehen bleiben, werden auch ihre Abwasserbehandlungsanlagen konstant bleiben, somit ergibt sich bei den Größenklassen IV und V keine Änderung bis 2030. Bis 2050 führen weitere Einsparmaßnahmen und Zentralisierungstendenzen zu einem allgemeinen Rückgang von 6 %, abgesehen von den Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklasse V.
- Der Vergleich der Abwassermenge in den Jahren 2007 und 2013 zeigt, dass die Jahresabwassermenge nicht zurückgegangen ist. Während die Menge an Schmutzwasser und Regenwasser leicht zurückgegangen ist (mögliche Ursachen könnten der Rückgang des Trinkwasserbedarfs sein und Maßnahmen zur dezentralen Niederschlagswasserbehandlung) ist die Fremdwassermenge leicht gestiegen. Der Anstieg der Fremdwassermenge könnte auf den Verfall der Kanalsysteme hindeuten[58] oder dass Sanierungsmaßnahmen nicht greifen.
- Der Anteil des stofflich verwerteten Klärschlamms geht seit 2007 zurück. Der überwiegende Teil des Klärschlammes (60 %) wird thermisch verwertet (Statistisches Bundesamt; Pressemitteilung vom 11.12.15).

#### 1.1.2.3 Verkehr

Rahmengebend wird für die Verkehrsentwicklung die Verkehrsleistung aus dem AMS der „Klimaschutzszenarien 2050“ gesetzt. Hier wird eine Steigerung der Personenverkehrsleistung um 3 % und der Güterverkehrsleistung um 25 % bis 2050 im Straßenverkehr unterstellt. Im Schienenverkehr sinkt Personenverkehrsleistung um 10 % und die Güterverkehrsleistung steigt um 103 % bis 2050. Für die Binnenschifffahrt ist ein leichter Rückgang der Verkehrsleistung um 2 % prognostiziert, der Seeschifffahrt wird ein Wachstum um 160 % unterstellt. Die Verkehrsleistung im Luftverkehr Verkehrsleistung wächst weiter stark an bis zum Jahr 2050 (Personenverkehr +103 %, Güterverkehr +118 %). (Repenning et al. 2015)

**Straßenverkehrsinfrastruktur**

- Die Bestände der **Straßen** und **fahrbahntragende Ingenieurbauwerke** im Bezugsjahr wurden aus der Studie „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau …“ (Knappe et al. 2016) entnommen und bilanziert. Auch die Entwicklung bis 2030 wurde Knappe et al. (2016) entnommen. Für die Entwicklung bis 2050 wurde die Netzentwicklung proportional zum Anstieg der Verkehrsleistung in diesem Zeitraum unterstellt.
- **Fahrbahnbegleitende Infrastrukturen** (z. B. Schutzplanken, Leuchten) sowie **Rast- und Autohöfe** für das Bezugsjahr wurden aus Mottschall/Bergmann (2013) übernommen. Die Ent-

57 Mit Blick auf den Bestand an Abwasserbehandlungsanlagen geben die Zahlen des statistischen Bundeamtes einen leicht rückläufigen Trend in den vergangenen Jahren wieder. Diese Entwicklung kann jedoch nicht ohne weiteres fortgeschrieben werden und z. B. von einer Konzentration der Anlagen in den größeren Klassen ausgegangen werden. Kleinkläranlagen könnten eher zunehmen und nicht wie bisher im Referenzszenario angenommen leicht zurückgehen. Hier zeichnen sich auch gegenläufigen Tendenzen in der Entwicklung ab (potentielle Entwicklung und Verbreitung dezentraler Abwasserbehandlungsanlagen (Kleinstkläranlagen) im ländlichen Raum, die durchaus günstige Lösungen mit CE-Zulassung darstellen). In der Sensitivitätsanalyse wird geprüft, inwiefern sich bei leicht veränderten Bestandszahlen für Kläranlagen die Ergebnisse variieren (vgl. Teil C ).

58 Vgl. hierzu: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/152749/umfrage/abwassermenge-in-deutschland-im-jahr-2007/)

wicklung der Bestände bis 2030 und 2050 wurde jeweils proportional zu den jeweiligen Straßeninfrastrukturen, nach einem Schlüssel aus Mottschall/Bergmann (2013), angenommen.

- Die Ausgangslage der Bestände für das Basisjahr der **Tankstellen und Ladesäulen** wurde aus Mottschall/Bergmann (2013) übernommen. Die Entwicklung bis 2030 und 2050 ist in Abhängigkeit des Endenergieverbrauchs und Fahrzeugbestands aus dem AMS nach „Energieversorgung des Verkehrs 2050“ (Kasten et al. in Bearbeitung) berechnet.
- Die Bestände der **Werkstätten** für das Basisjahr sind ebenso aus Mottschall/Bergmann (2013). Die Entwicklungen bis 2030 und 2050 sind als proportional zu der Entwicklung des Fahrzeugbestandes aus dem rahmengebenden AMS 2012 des Klimaschutzszenario 2050 (Repenning et al. 2015).

**Schienenverkehrsinfrastruktur**

- Die Bestände der **Gleis- und Energieversorgungsinfrastrukturen** im Basisjahr sind der VDI-Studie „Ressourceneffizienzpotentiale im Tiefbau“ (Bergmann et al. 2015) entnommen. Auch die Entwicklung bis 2030 ist der Studie nachempfunden und entspricht den Planwerken des BVWP. Die zugrunde liegende Verkehrsleistungsprognose nach AMS 2012 liegt in 2050 bei 85 Mrd. Pkm und 217 Mrd. tkm. Nach Holzhey (2010, 2012) ist der hier unterstellte Neu- und Ausbau für die Gleisinfrastruktur (rund 2000 km) ausreichend um weitaus mehr Kapazitäten aufzubauen als über das AMS prognostiziert. Daher wird ab 2030 kein weiterer Zubau bei den Gleisanlagen unterstellt.
- Die **Signal- und Kommunikationstechnik** sowie **Brücken und Tunnel** wurden für das Basisjahr bestandsseitig aus Schmied/Mottschall (2010) übernommen. Die Entwicklung bis 2030 und 2050 wurde direkt proportional zum Zuwachs der Gleisanlagen angenommen.
- Bestände der **Bahnhöfe und Werke** im Basisjahr sind ebenso aus Schmied/Mottschall (2010) bezogen und sind für die Jahre 2030 und 2050 als konstant bleibend angenommen.

**Schifffahrt**

- Die Anzahl an **Schleusen** und **Kanalbrücken** für das Basisjahr stammen aus Angaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV 2014). Für die materialseitig erfassten Bestände der **Binnenhäfen** wurden Daten aus Steger et al. (2011) benutzt. Kanäle, Binnenwasserstraßen, Binnenwasser-Bauwerke (Schleusen etc.) und Binnenhäfen sind in der Entwicklung als konstant angenommen.
- **Kais und Lager der Seehäfen** werden nach Steger et al. (2011) für das Basisjahr erfasst und ein Ausbau proportional zur Verkehrsleistung mit Faktor 0,5 bis 2030 und 2050 aus dem AMS angenommen.

**Luftverkehr**

- Die Bestände der Luftverkehrsinfrastrukturen für das Basisjahr wurden aus Mottschall/Bergmann (2013) übernommen. Die Bestandsentwicklung erfolgt proportional skaliert zur Verkehrsleistung mit dem Faktor 0,75. Da im Vergleich zur Seeschifffahrt die Steigerung der Start- und Landetaktungen über sicherheitstechnische Aspekte auch mit technologischem Fortschritt stärker begrenzt bleiben wird.

#### 1.1.2.4 IKT

Die grundlegenden Annahmen im IKT Sektor gehen von einer Durchdringung aller Lebensbereiche mit vernetzten IKT-Geräten, eine stärkere Zentralisierung der Datenverarbeitung und einem starken Ausbau der Netzwerk-Infrastruktur aus. Dies drückt sich u.a. aus in:

- Anschluss aller Haushalte/Gebäude ans schnelle Internet bis 2020
- Anschluss aller Geräte („Dinge“) ans schnelle Internet bis 2030
- Ausbau von mehreren parallelen, redundanten Infrastrukturen (Mobilfunk, Glasfaser, Breitbandkabel)
- Vervielfachung des übertragenen Datenvolumens (x 2,5 pro Dekade)
- Der Bestand im Bezugsjahr wurde für die **Rechenzentren** und Serverinfrastruktur aus Borderstep (2014) übernommen. Für die Entwicklung bis 2030 und 2050 wurde jeweils von einer Steigerung der Kapazität um 50 % ausgegangen.
- Für die bestehenden **Datenübertragungsnetze** wurden Zahlen aus Uzun et al. (2012) für die Mobilfunkstationen und Sharp (2011) hinterlegt. Bis 2050 wird für Mobilfunkstationen und Kupferkabel ein Anstieg um 50 % angenommen und bis dahin linear interpoliert. Für das Glasfasernetz wird ein extrem starkes Wachstum um 600 % bis 2050 angenommen.

Aus den genannten Annahmen wurde ausgehend vom heutigen Infrastrukturbestand der Bestand an Infrastrukturen in den Jahren 2030 und 2050 abgeschätzt. Der IKT-Sektor ist von allen Sektoren derjenige, welcher am schnellsten durch neue Technologien und Innovationen durchdrungen werden kann. Daher sind die Entwicklungen im IKT-Bereich einerseits mit einer sehr hohen Geschwindigkeit verbunden, andererseits ist die Quantifizierung des Mengengerüsts bis zum Jahr 2050 mit vergleichsweise sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Die Abschätzung für den IKT-Bereich erfolgte daher behelfsweise auf Grundlage von Trendreports von Unternehmensberatungen, die eine Einschätzung der IKT-Wirtschaft für das künftige Marktwachstum beinhalten (AG2 des Nationalen IT-Gipfels 2011, Borderstep 2010, Borderstep 2014, BMWi 2014, BMWi 2009, Cisco 2014, Gartner 2014, Roland Berger 2011, Scharp 2011). Die Zahlen für einzelne Netze und Anlagen sind in der Anlage zu diesem Bericht gelistet. Dort sind auch jeweils die Annahmen und Berechnungsgrundlagen samt Quellen aufgeführt.

## 1.2 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für das Referenzszenario

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für das Referenzszenario sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt. Der kumulierte Rohstoffaufwand (**KRA**) durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur steigt von 196 Mt/a im Jahr 2012 um 31 Mt/a auf 226 Mt/a (2050). Bau und Unterhalt der Infrastruktur verursachen einen Großteil des gesamten KRA (84 % im Jahr 2012). Mit 12 Mt/a (+28 %) findet die größte Zunahme im Infrastruktursektor „Energie“ statt. Zur stärksten relativen Veränderung führt hingegen der Ausbau der IKT-Infrastruktur. Der durch Bau und Unterhalt der IKT-Infrastruktur verursachte KRA steigt von 9 Mt/a um 62 % auf 15 Mt/a im Jahr 2050 an. Der durch Bauaufwendungen (Bauseitiger Energieverbrauch) und Betrieb der Infrastruktur verursachte KRA nimmt dagegen leicht ab, so dass sich insgesamt eine Erhöhung des KRA von 233 Mt/a (2012) um 15 Mt/a auf 248 Mt/a im Jahr 2050 ergibt. Dies ist insbesondere durch den Rückgang der durch die Infrastruktur der Energieversorgung begründet. Die Abnahme des fossilen Kraftwerksbestandes führt zu einer Reduktion der mit den Eigenverbräuchen verbundenen Verbrennung fossiler Energieträger. In Hinblick auf den kumulierten Rohstoffaufwand erhöht sich im Referenzszenario also die Ressourceninanspruchnahme der betrachteten Infrastrukturen bis zum Jahr 2050.

In Bezug auf den kumulierten Energieaufwand (**KEA**) zeigt sich ein ähnliches Bild. Dieser steigt im Referenzszenario durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur von 391 PJ/a im Jahr 2012 um 18 % (70 PJ/a) auf 462 PJ/a im Jahr 2050. Beim KEA fällt jedoch die Minderung über die Zeit bei den Bauaufwendungen und dem Betrieb der Infrastruktur größer aus als beim KRA, weshalb der durch die Infrastrukturen verursachte KEA im Jahr 2050 insgesamt 36 % bzw. 141 PJ/a unter dem Jahr 2012 liegt. Auch hier liegt die Ursache insbesondere bei der Reduktion des Bestandes an Kohlekraftwerken. Der KEA aus dem Betrieb der Energieversorgungsinfrastruktur liegt im Jahr 2050 rund 136 PJ/a bzw. 52 % unter dem Jahr 2012. Unter Einbezug der Bauaufwendungen und des Betriebes der Infrastruktur

verursacht der Bereich „Energie“ im Jahr 2012 mit 42 % des gesamten KEA den größten Anteil, gefolgt von der Verkehrsinfrastruktur mit 41 %.

Mit rund 22 % fällt das Wachstum der Treibhausgasemissionen (**THG**) durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur bis zum Jahr 2050 im Referenzszenario am größten aus. Insgesamt steigen die jährlichen Treibhausgasemissionen um 4 Mio. t/a auf 23 Mio. t/a in 2050. Mit rund 3 Mio. t/a entfällt entfallen 69 % dieser gestiegenen THG-Emissionen auf den Bereich der Energieinfrastruktur. Gerade dort findet jedoch in Hinblick auf den Betrieb die stärkste Emissionsminderung statt. Die Emissionen durch den Betrieb liegen dort im Jahr 2050 rund 17 Mio. t/a (-58 %) unter dem Jahr 2012. Insgesamt liegen die Emissionen im Jahr 2050 mit 50 Mio. t/a rund 19 Mio. t/a bzw. 27 % unter dem Jahr 2012.

Während die Flächeninanspruchnahme (**versiegelte Fläche**) in den Infrastruktursektoren Energie und Wasser/ Abwasser leicht zurückgeht steigt sie in den Bereichen IKT (rund 300 ha bzw. +200 %) und Verkehr (+33.000 ha bzw. +7 %). Insgesamt führt die Verkehrsinfrastruktur mit einem Anteil von rund 95 % für den Großteil der Flächeninanspruchnahme (versiegelte Fläche) verantwortlich. Im Referenzszenario steigt die Flächeninanspruchnahme bis zum Jahr 2050 um 6 % bzw. 31.000 ha an.

Tabelle 4: KRA, KEA und THG im Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau- und Unterhalt | Verkehr | 101 | 107 | 109 | 270 | 285 | 290 | 11 | 12 | 12 |
| | IKT | 9 | 11 | 15 | 5 | 7 | 10 | 0 | 0 | 1 |
| | Wasser/Abwasser | 42 | 46 | 47 | 27 | 29 | 30 | 2 | 2 | 2 |
| | Energie | 43 | 51 | 55 | 89 | 124 | 133 | 6 | 8 | 9 |
| | *Zwischensumme* | **196** | **215** | **226** | **391** | **445** | **462** | **19** | **22** | **23** |
| Bau-aufwendungen | Verkehr | 4,2 | 3,2 | 2,1 | 54,5 | 45,4 | 29,2 | 5,5 | 4,2 | 2,6 |
| | IKT | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,35 | 0,54 | 0,77 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| | Wasser/Abwasser | 0,14 | 0,12 | 0,09 | 1,95 | 1,83 | 1,35 | 0,19 | 0,16 | 0,11 |
| | Energie | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,91 | 0,70 | 0,59 | 0,08 | 0,06 | 0,04 |
| | *Zwischensumme* | **4,4** | **3,3** | **2,3** | **57,7** | **48,5** | **31,9** | **5,8** | **4,5** | **2,8** |
| Betrieb | Verkehr | 1,7 | 1,3 | 1,0 | 22,1 | 19,4 | 13,5 | 2,2 | 1,8 | 1,2 |
| | IKT | 5,4 | 7,0 | 7,2 | 69,2 | 98,8 | 96,1 | 7,1 | 9,3 | 8,5 |
| | Wasser/Abwasser | 3,1 | 1,9 | 1,2 | 39,8 | 27,3 | 15,8 | 4,1 | 2,6 | 1,4 |
| | Energie | 22,4 | 15,6 | 10,0 | 262,9 | 201,0 | 127,1 | 30,0 | 21,4 | 12,7 |
| | Zwischensumme | **33** | **26** | **19** | **394** | **346** | **253** | **43** | **35** | **24** |
| Summe | | **233** | **244** | **248** | **843** | **840** | **746** | **68** | **62** | **50** |
| *Nutzung*[1)] | *Kraftwerke (fossil)* | *243* | *170* | *106* | *3.112* | *2.410* | *1.414* | *341* | *248* | *137* |

[1)] ***Hinweis:*** Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Difu/Öko-Institut.

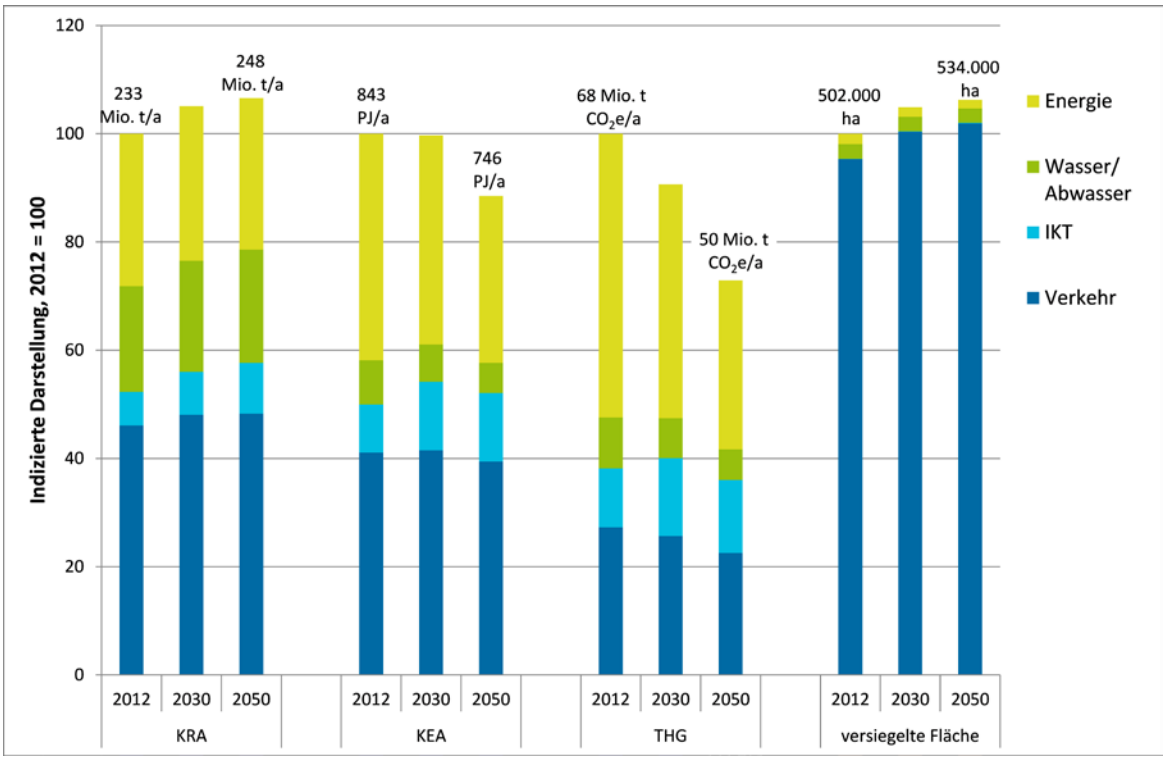
Tabelle 5: Versiegelte Fläche im Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Sektor | Versiegelte Fläche in 1.000 ha | | |
|---|---|---|---|
| | 2012 | 2030 | 2050 |
| Verkehr | 479 | 504 | 512 |
| IKT | 0 | 0 | 0 |
| Wasser/Abwasser | 14 | 14 | 13 |
| Energie | 10 | 9 | 8 |
| *Summe* | 502 | 527 | 534 |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Ausgedrückt in einem Balkendiagramm ergibt sich folgendes Bild:

Abbildung 20: Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario – Gesamtübersicht – für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung, 2012 = 100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für die 4 Sektoren und ihre Teilsysteme separat dargestellt.

### 1.2.1 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Energie

Die nachfolgenden Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die Ergebnisse für die Indikatoren KRA, KEA, THG und die versiegelte Fläche für den Infrastrukturbereich der Energieversorgung im Detail.

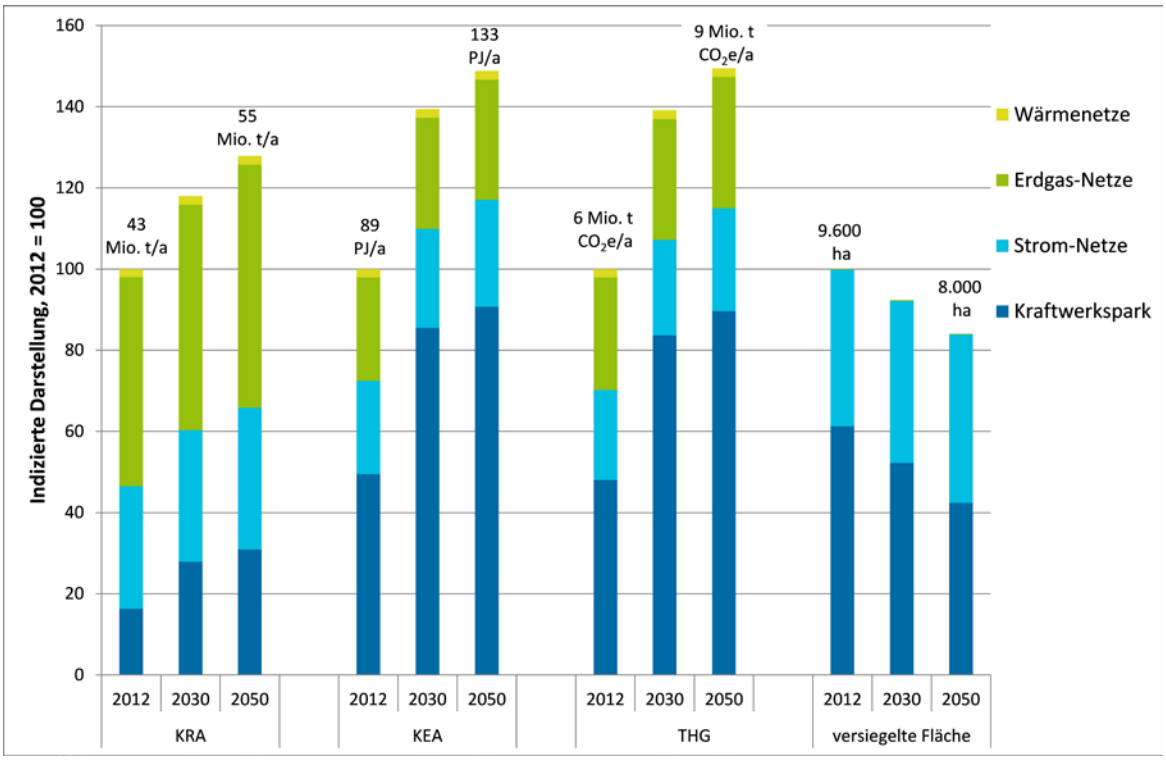
Abbildung 21 beinhaltet dabei den Bau und Unterhalt der Infrastruktur. Durch den Ausbau der netzte und der erneuerbaren Erzeugungsanlagen steigen KRA, KEA und THG bis zum Jahr 2050 weiter an.

Insbesondere der KEA und die Treibhausgasemissionen liegen mit einem Anstieg um jeweils rund 50 % im Jahr 2050 deutlich über dem Jahr 2012.

Der durch die Energiewende bedingte Umstieg auf Photovoltaik und Windenergie zeigt sich auch in einem starken Zuwachs des KEA durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur. bis zum Jahr 2030. Der durch den Kraftwerkspark verursachte kumulierte Energieaufwand steigt bis 2030 um rund 73 %. Insgesamt steigt der KEA der Infrastruktur der Energieversorgung um 43 PJ/a auf 133 PJ/a.

Die versiegelte Fläche nimmt im Referenzszenario bis zum Jahr 2050 um 16 % ab. Haupttreiber ist der Kraftwerkspark, da die Flächen für Photovoltaik und um Anlagen zur Windenenergieerzeug überwiegend anderen Flächenkategorien zugeordnet werden, sich als der Rückgang der fossilen Erzeugungsanlagen in den Zahlen wiederspiegelt.

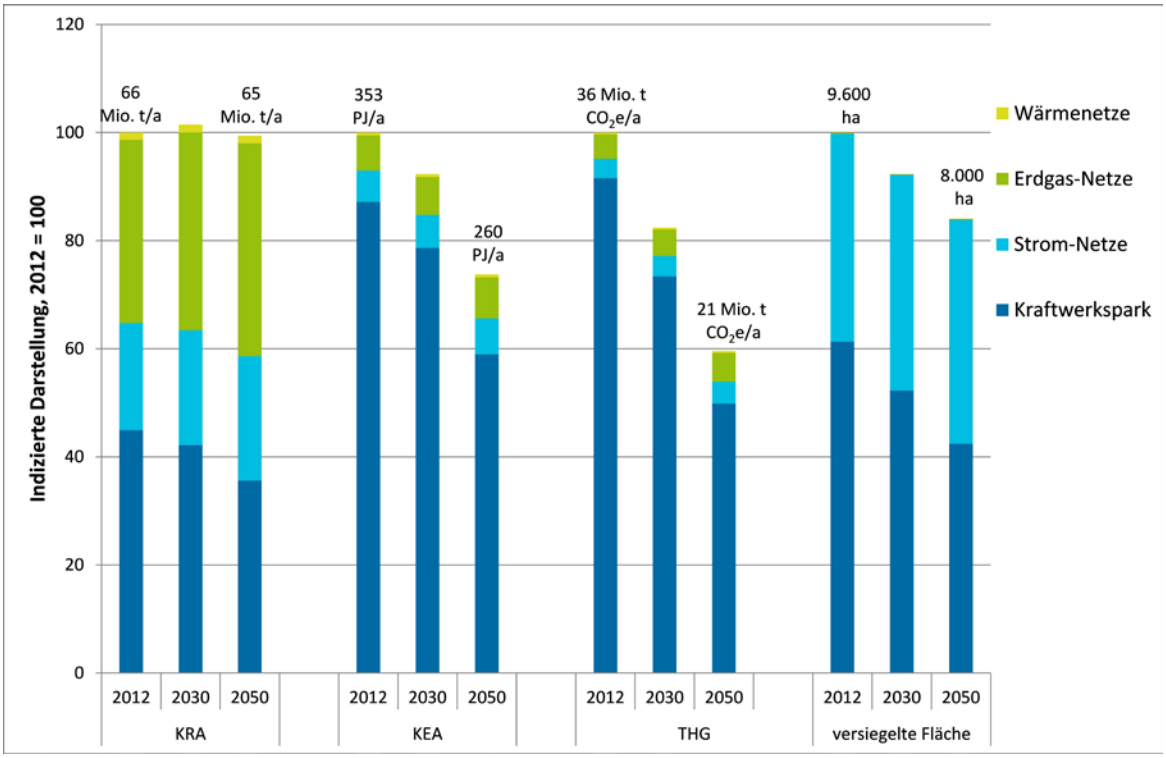
Abbildung 21: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Energie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Werden neben dem Bau und Unterhalt der Infrastruktur auch die Bauaufwendungen und der Betrieb mit in die Betrachtungen einbezogen ergibt sich ein anderes Bild (s. Abbildung 22). Mit Ausnahme des KRA sinkt die Ressourceninanspruchnahme für alle betrachteten Wirkungskategorien. Aus der indizierten Darstellung (2012 = 100) geht hervor, dass der Rückgang des KRA auf Seiten des Kraftwerksparks bis zum Jahr 2050 (6 Mio. t/a) fast vollständig durch die zusätzliche Ressourceninanspruchnahme auf Seiten der Strom- und Erdgasnetze ausgeglichen wird. Treiber ist der Rückgang der Stromerzeugung in Braun- und Steinkohlekraftwerken, welche über den Eigenverbrauch im Betrieb berücksichtigt ist.

Abbildung 22: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb des Infrastrukturbereichs „Energie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)



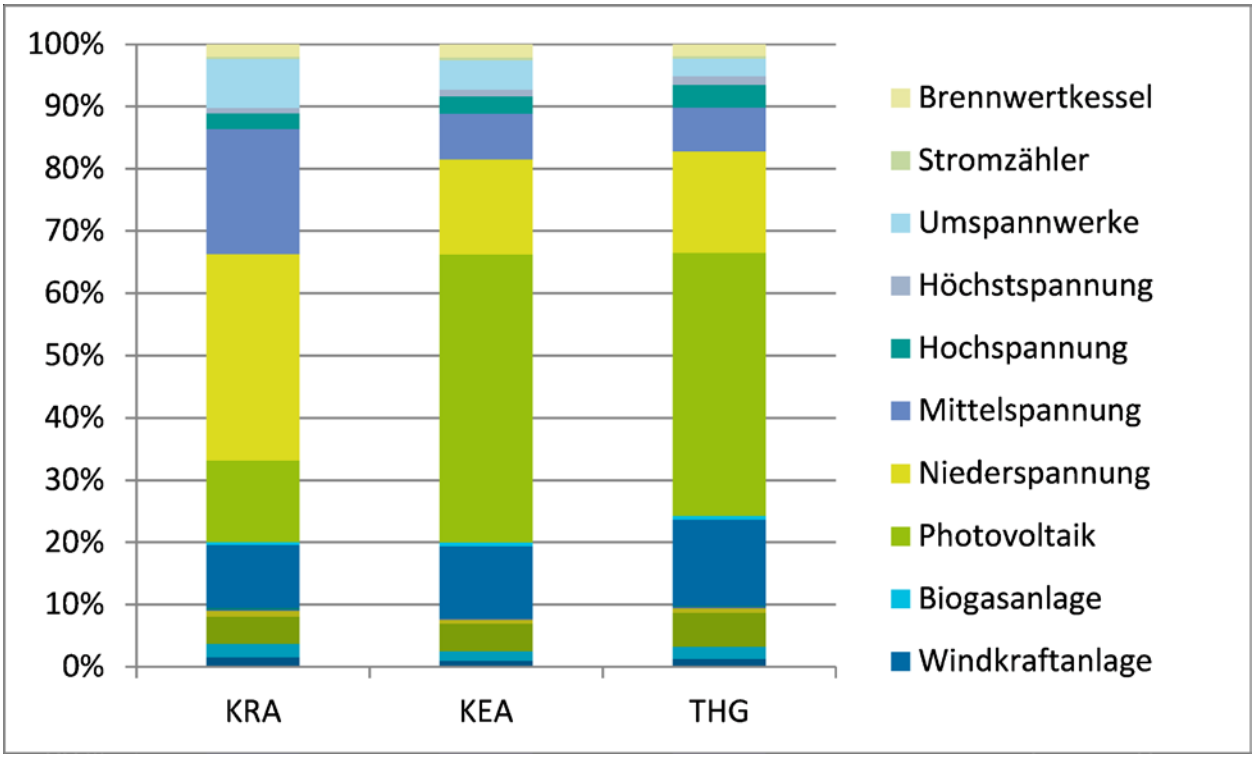

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Stromversorgung**

Eine Auswertung über die verschiedenen Indikatoren für den des Teilsystem Stromversorgungsnetz ergibt im Jahr 2012 20 Mio. t/a (KRA), 65 PJ/a (KEA) und rund 3 Mio. t $CO_2$-äq/a (THG) für Bau und Unterhalt der Infrastrukturen.

Bei den Netzen ist das Niederspannungsnetz die dominante Komponente (siehe Abbildung 23). Im Verhältnis sind Kraftwerkspark und Netze etwa ähnlich bedeutsam. Bei dem Kraftwerkspark stechen Windkraft- und Photovoltaikanlagen besonders heraus.

Abbildung 23: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Stromversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario

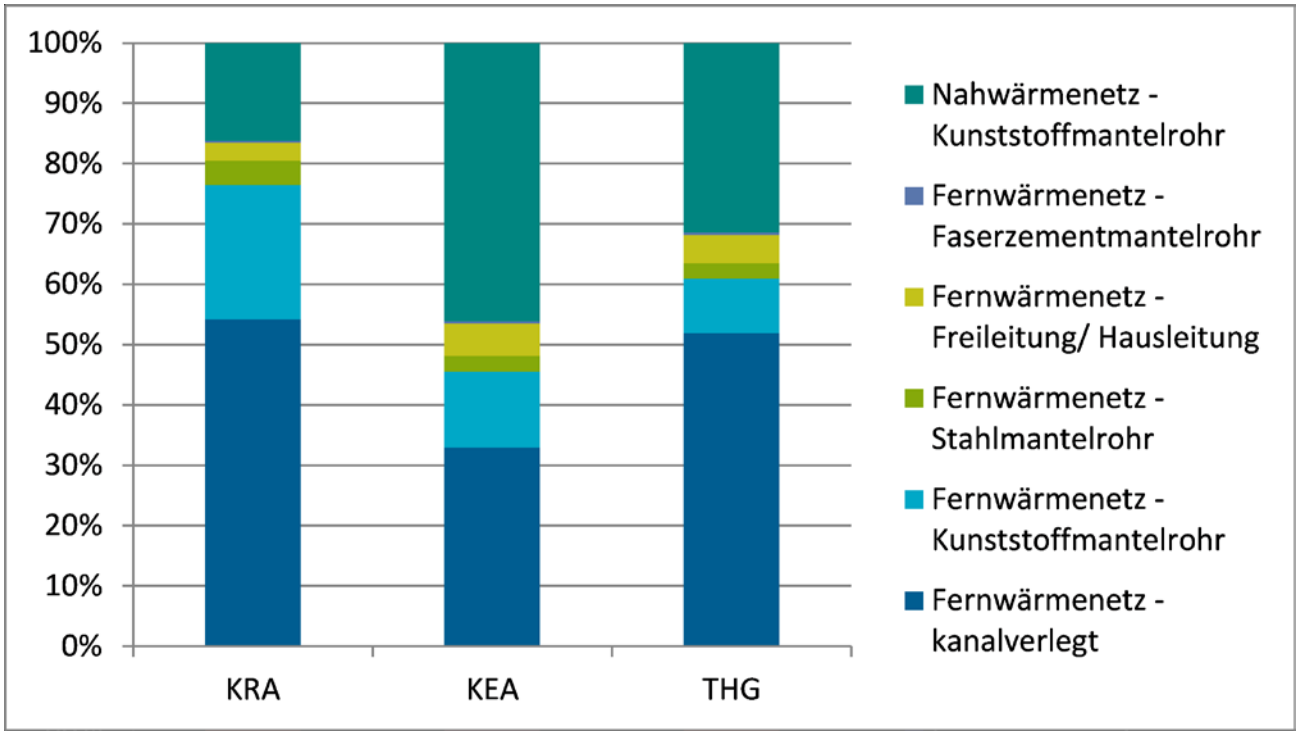



Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Wärmeversorgung**

Über die ermittelten Bestände des Wärmeversorgungsnetzes lassen sich für Bau und Unterhalt der Infrastruktur folgende Umweltwirkungen über die Indikatoren KRA, KEA und THG-Emissionen zuordnen: 0,9 Mio. t/a an Rohstoffaufwendungen und 1,8 PJ/a kumulierter Energieaufwand und 0,1 Mio. t $CO_2$-äq/a Treibhausgasemissionen. Die relativen Anteile sind stark abhängig vom betrachteten Indikator. Abbildung 6 veranschaulicht jedoch, dass das Nahwärmenetz, das kanalverlegte Fernwärmenetz sowie das Fernwärmenetz mit Kunststoffmantelrohr bestimmende Komponenten sind.

Abbildung 24: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Wärmeversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario

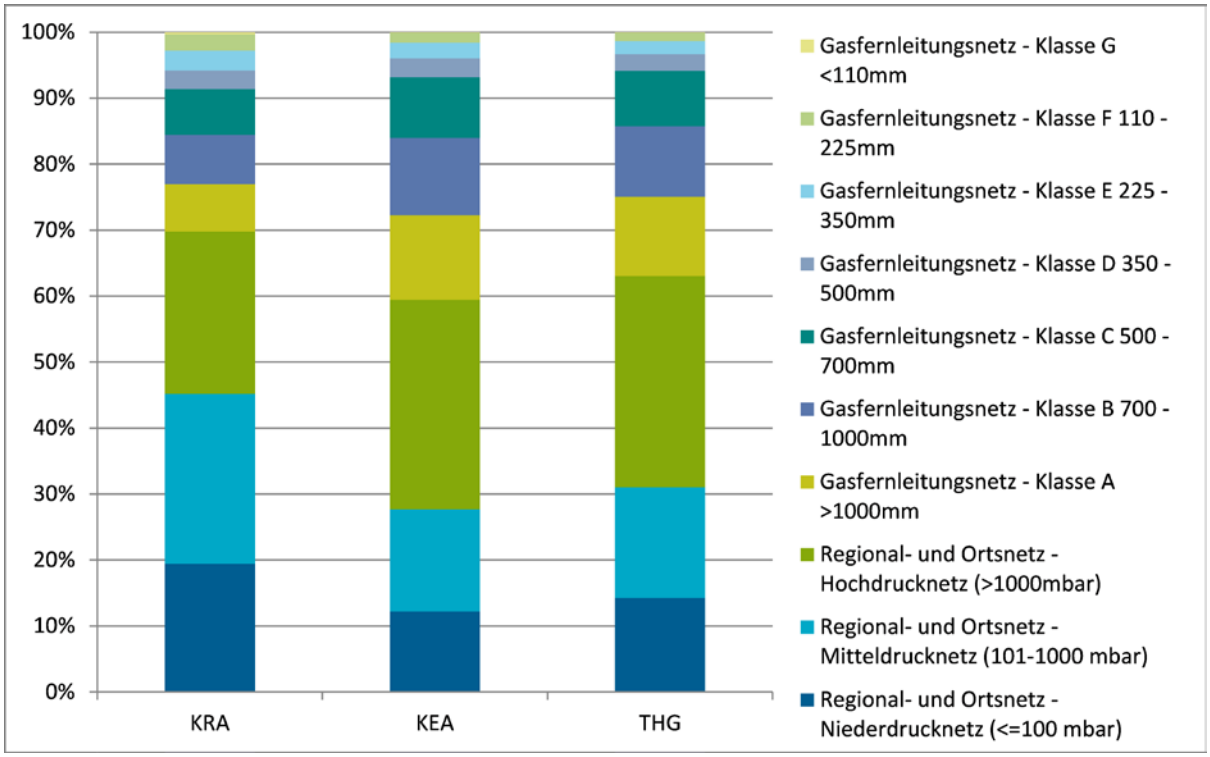



Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Gasversorgung**

Bau und Unterhalt der Infrastruktur der Gasversorgung haben einen Rohstoffaufwand von 22 Mio. t/a und benötigen 23 PJ/a an Primärenergie und verursachen 1,6 Mio. t $CO_2$-äq/a Treibhausgasemissionen. Die weitere Unterteilung nach Fernleitungs- und Regional- und Ortsnetz zeigt eine leicht höhere Relevanz des Regional- und Ortsnetz. Jeweils für die Netzsysteme lassen sich keine stark dominierenden Komponenten herausfiltern.

Abbildung 25: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Gasversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

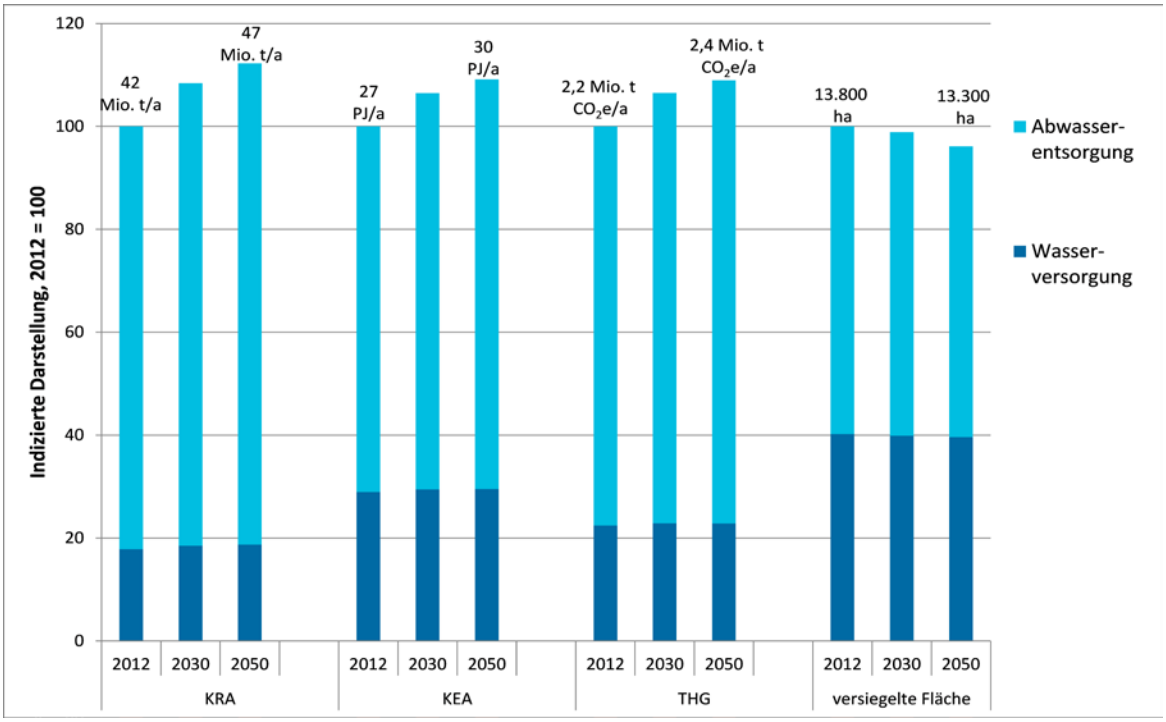
### 1.2.2 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Wasserver- und Abwasserentsorgung

In Abbildung 26 werden die Ergebnisse für KRA, KEA, THG und die versiegelte Fläche für die Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen (Bau und Unterhalt) indiziert dargestellt, wobei der Ausgangswert aus dem Jahr 2012 100 % darstellt.

Im Referenzszenario steigt der jährliche KRA bis zum Jahr 2050 um rund 12 %, der KEA um gut 9 % und die Treibhausgasemissionen um 9 %. Der Flächenverbrauch sinkt um rund 4 %. Über alle Wirkungskategorien hinweg besitzt die die Abwasserentsorgung den größeren Anteil, wobei dies beim KRA am stärksten auffällt.

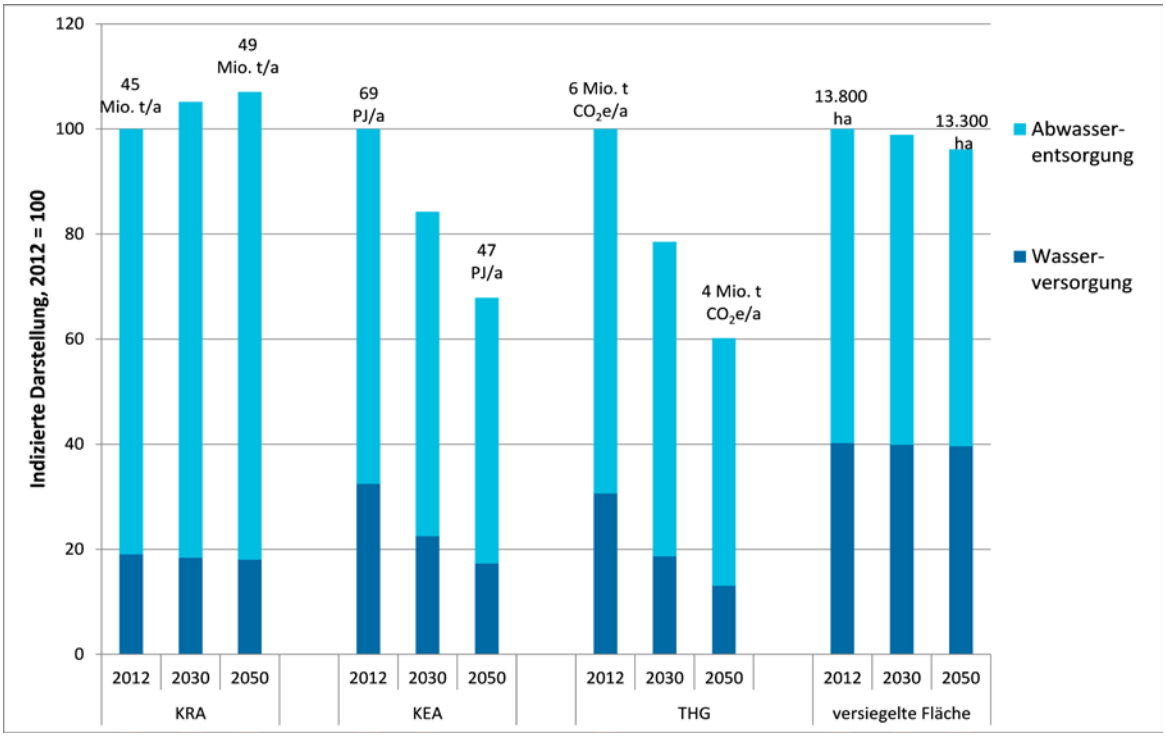
Im Gegensatz zur Abwasserentsorgung bleiben KRA, KEA und THG der Wasserversorgung bis zum Jahr 2050 nahezu konstant. Bei den Infrastrukturen zur Abwasserentsorgung steigen KRA und KEA trotz einer Abnahme der versiegelten Flächen.

Abbildung 26: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Wasserver- und Abwasserentsorgung“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 27: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb des Infrastrukturbereichs „Wasserver- und Abwasserentsorgung“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Werden neben dem Bau und Unterhalt der Infrastruktur auch die Bauaufwendungen und der Betrieb mit in die Betrachtungen einbezogen ergibt sich das in Abbildung 27 dargestellte Bild.

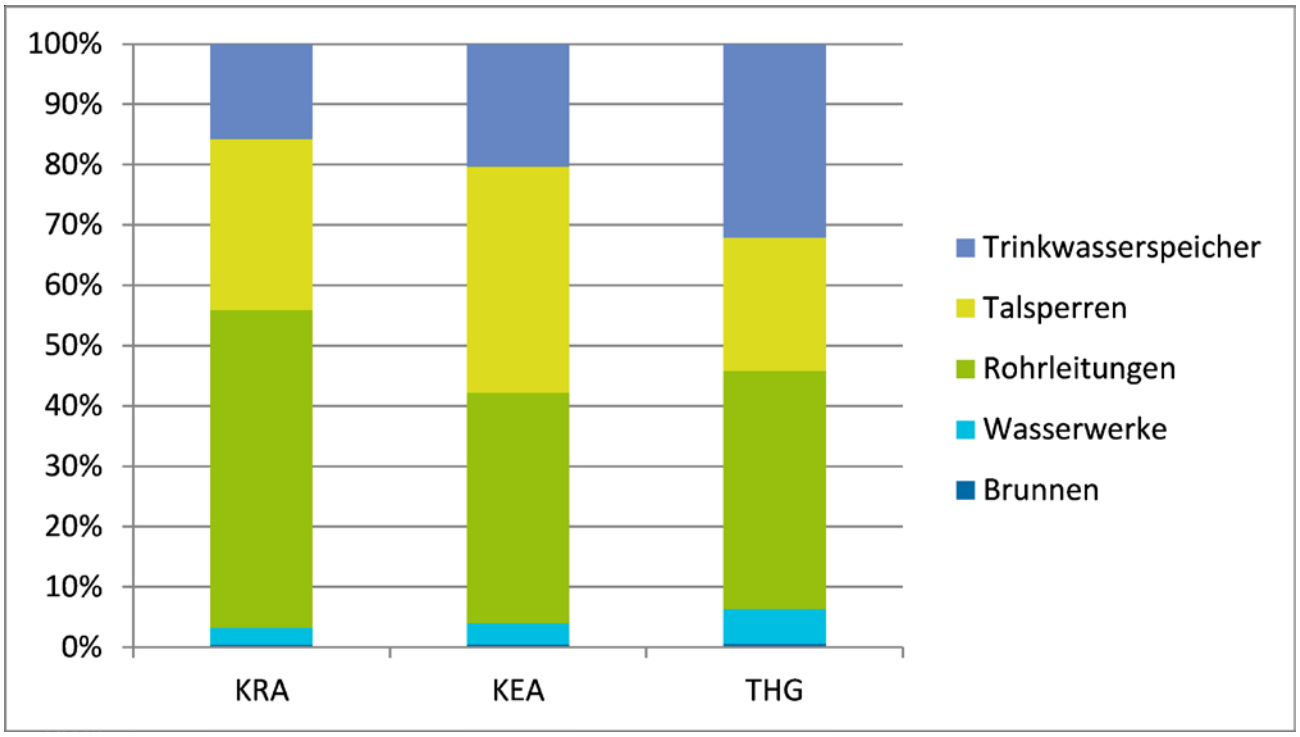
Mit Ausnahme des KRA sinkt die Ressourceninanspruchnahme für alle betrachteten Wirkungskategorien. Der Anstieg des KRA wird dabei ausschließlich durch die Umgestaltung der Abwasserentsorgung verursacht, welche eine zusätzliche Ressourceninanspruchnahme verursacht. Dabei liegt der KRA der Abwasserentsorgung im Jahr 2050 mit 40,4 M/a rund 4 Mt/a über dem Jahr 2012.

Hinsichtlich der Wirkungskategorien KEA und den Treibhausgasemissionen kann ein Rückgang um 32 % (KEA) bzw. 40 % (THG) beobachtet werden. Ursächlich ist der veränderte Strommix mit einem abnehmenden Anteil an Strom aus Braun- und Steinkohle. Dieser Strommix wirkt sich positiv auf Betrieb und Bauaufwendungen aus. Insbesondere der Betrieb dominiert dabei KEA und die Treibhausgasemissionen (THG).

**Wasserversorgung**

Im Teilsystem Wasserversorgung werden durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur 0,5 Mio. t $CO_2$-äq/a emittiert. Der Rohstoffaufwand beträgt 7,5 Mio. t/a und es werden 7,8 PJ/a Primärenergien aufgewendet. Die hier betrachteten Umweltwirkungen durch die Infrastrukturen des Wasserversorgungssektors werden durch Rohrleitungen dominiert, je nach Indikator zwischen 38 % – 57 %. Trinkwasserspeicher und Talsperren tragen einen Großteil der weiteren Relevanz.

Abbildung 28: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Wasserversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario



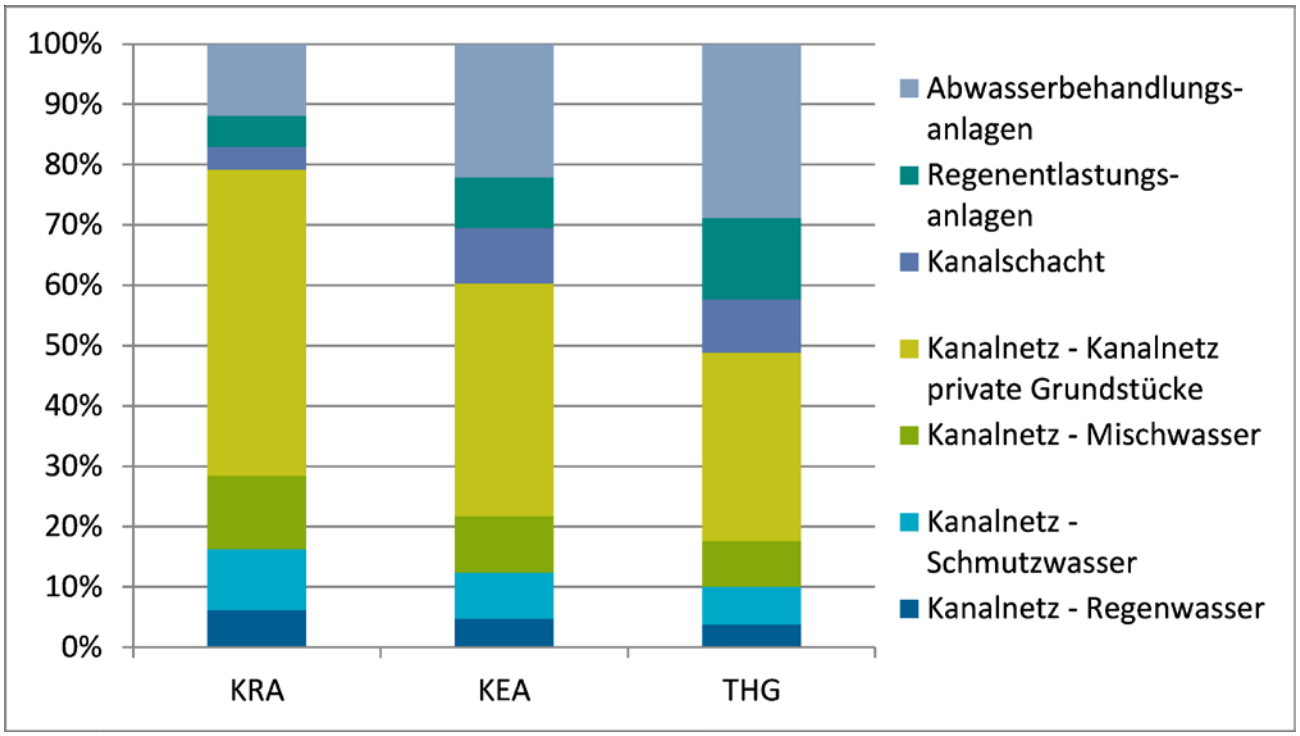

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Abwasserentsorgung**

Für das Teilsystem Abwasserentsorgung wurden THG-Emissionen durch Bau und Unterhalt von 1,7 Mio. t $CO_2$-äq/a berechnet. Der KRA beträgt rund 35 Mio. t/a Rohstoffaufwand, der KEA wurde auf rund 19 PJ/a ermittelt. Das Netz hat hier im Vergleich zu den Anlagen eine relativ höhere Relevanz als

die Anlagen, wobei die Kanäle auf privatem Grund hierbei einen ähnlich hohen Anteil tragen wie die öffentlichen Netze (vgl. Abbildung 29).

Abbildung 29: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Teilsystems der Wasserversorgung im Jahr 2012 im Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

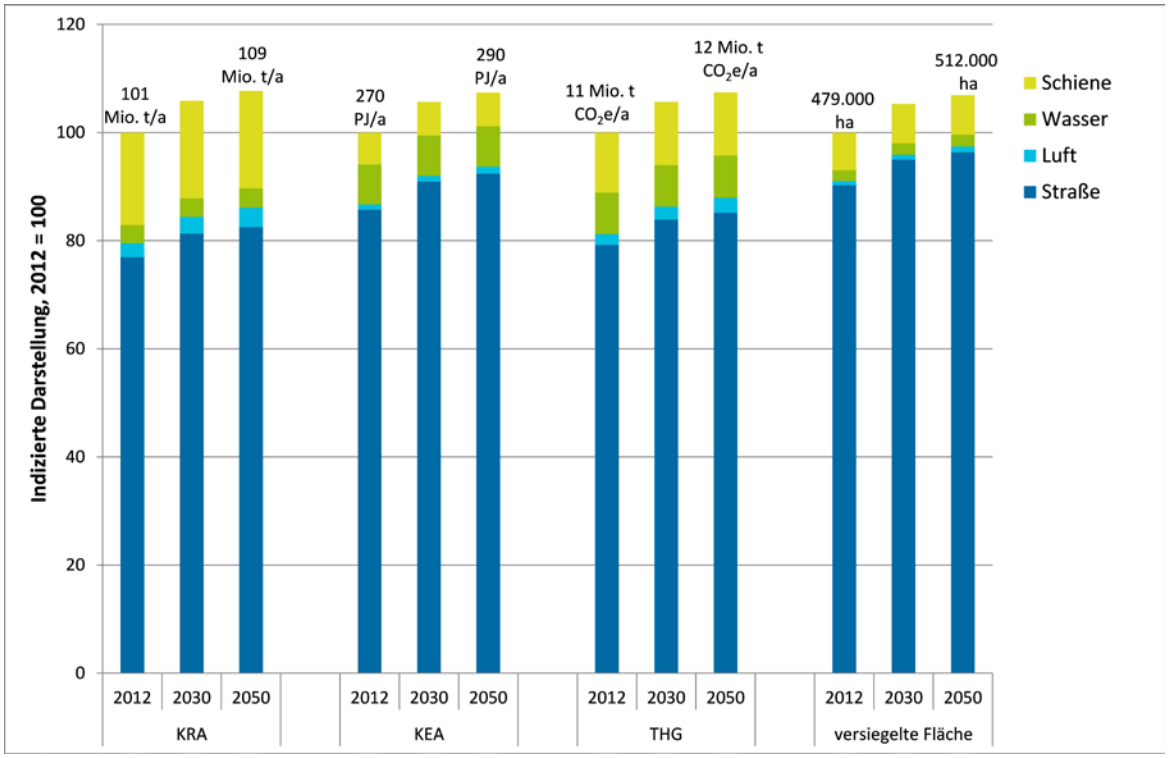
### 1.2.3 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Verkehr

In Abbildung 30 werden die Ergebnisse für KRA, KEA, THG durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur und die versiegelte Fläche für den Infrastrukturbereich Verkehr nach Verkehrsträger differenziert dargestellt. Die Ergebnisse sind indiziert dargestellt, der Ausgangswert aus dem Jahr 2012 stellt 100 da.

Im Referenzszenario findet bei den drei betrachteten Indikatoren bis zum Jahr 2050 ein Anstieg von sieben bis acht Prozent statt. Über alle Wirkungskategorien hinweg besitzt die Straßenverkehrsinfrastruktur den größten Anteil. Auffällig ist, dass der Anteil der Schienenverkehrsinfrastruktur am gesamten kumulierten Rohstoffaufwand deutlich höher ist als beim KEA, den Treibhausgasemissionen und der versiegelten Fläche.

In Bezug auf den Anstieg bis zum Jahr 2050 sticht die Luftverkehrsinfrastruktur heraus. Der Einfluss auf das Gesamtergebnis ist zwar gering, dennoch finde hier im Referenzszenario ein Anstieg von rund 40 % über die alle Indikatoren statt.

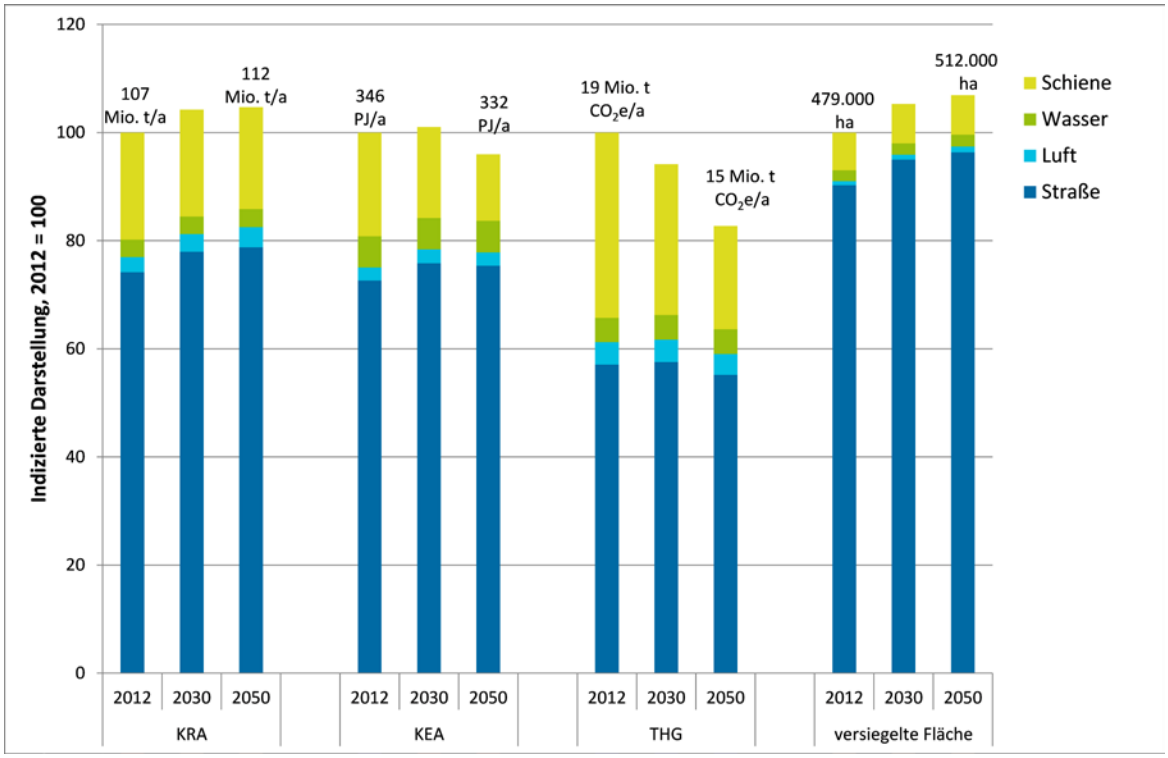
Abbildung 30: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Verkehr“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Werden neben dem Bau und Unterhalt der Infrastruktur auch die Bauaufwendungen und der Betrieb betrachtet, liegt der KRA mit 112 Mio. t/a im Jahr 2050 rund 5 % über dem Jahr 2012. Aufgrund des verbesserten Strommix sinken die Indikatoren KEA und THG bis zum Jahr 2050 um 4 % (KEA) bzw. 17 % (THG). Besonders stark fällt die Minderung bei der Infrastruktur des Schienenverkehrs aus. Dort liegt der KEA im Jahr 2050 mit 12,3 PJ/a rund 36 % unter dem Jahr 2012. Bei den Treibhausgasemissionen beträgt die Minderung im Vergleich zum Jahr 2012 sogar 44 % (vgl. Abbildung 31).

Abbildung 31: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb des Infrastrukturbereichs „Verkehr“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Im Weiteren werden die vier Teilsektoren in Hinblick auf die prozentuale Zusammensetzung der Umweltauswirkungen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur der einzelnen Komponenten im Jahr 2012 dargestellt.

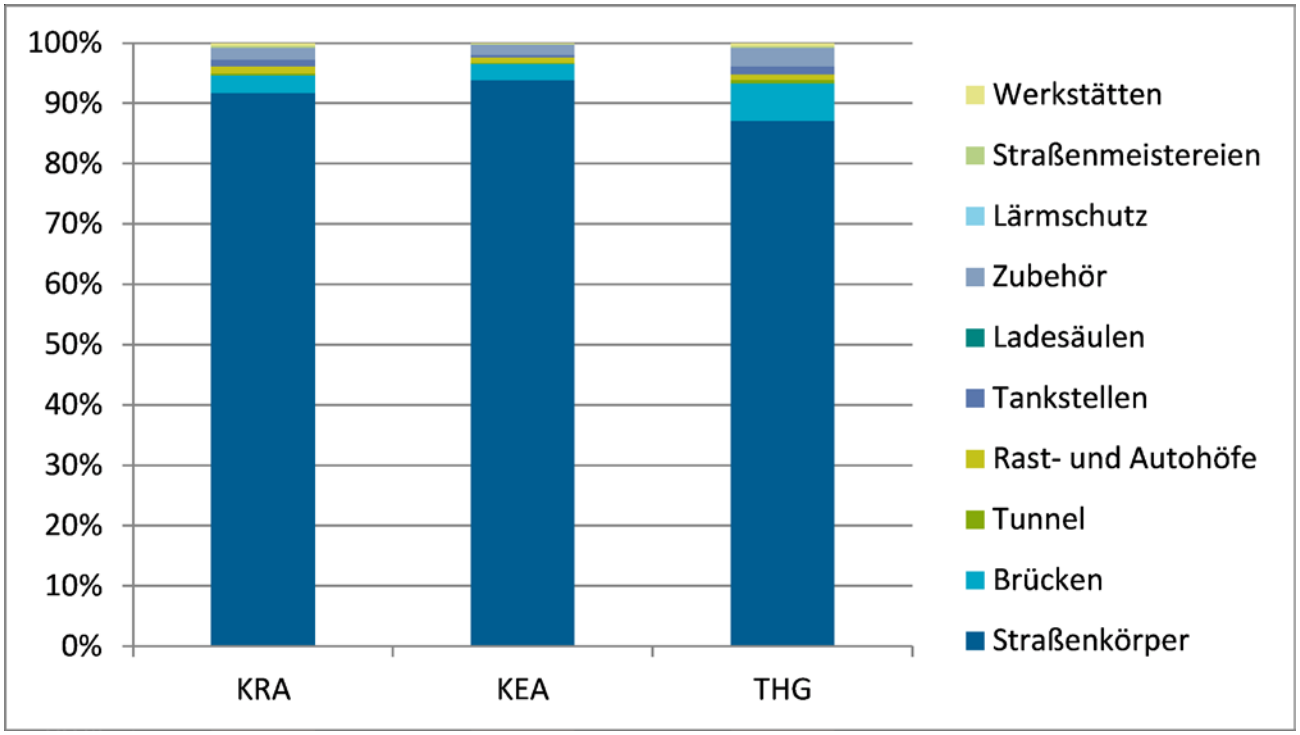
**Teilsystem Straßenverkehr**

Abbildung 32 zeigt die prozentuale Verteilung von KRA, KEA und THG durch den Bau und Unterhalt der Infrastruktur. Über alle Indikatoren hinweg dominiert der Straßenkörper die Ressourceninanspruchnahme.

Es ist ein gesamter kumulierter Rohstoffaufwand von 78 Mio. t/a auf den Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastrukturen rückzuführen. Der äußerst dominante Anteil der Straßenkörper ist bei Betrachtung über diesen Indikator noch auffälliger. 72 Mio. t/a Rohstoffe werden für den Bau der Straßenkörper eingesetzt, dies entspricht einem Anteil von 92 % der Gesamtaufwendungen. Die Brückenbauwerke tragen mit 2,3 Mio. t/a Rohstoffaufwand noch 3 % der gesamten Aufwendungen. Der Straßenzubehörführt mit 1,5 Mio. t/a zu einem Anteil in Höhe von 2 % des KRA durch Bau und Unterhalt der Straßeninfrastruktur.

Für den Indikator des kumulierten Primärenergieaufwands (KEA) wird für das Teilsystem Straßenverkehr ein KEA von 231 TJ/a berechnet. Wie in Abbildung 12 erkennbar, ist auch bei Betrachtung über diesen Indikator dem Bau von Straßenkörpern ein erheblicher Teil des Gesamtaufwands zuzuordnen. Mit einem Primärenergieaufwand von 217 PJ/a ist der Anteil am Gesamtaufwand bei 94 %. Die Straßenbrücken haben mit einem KEA von 6 PJ/a einen Gesamtanteil von 3 %. Dem Straßenzubehör kommt mit 4 PJ/a ein Anteil von 2 % der gesamten Aufwendungen durch Bau und Unterhaltdes Teilsektors zu.

Abbildung 32: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Straßenverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario

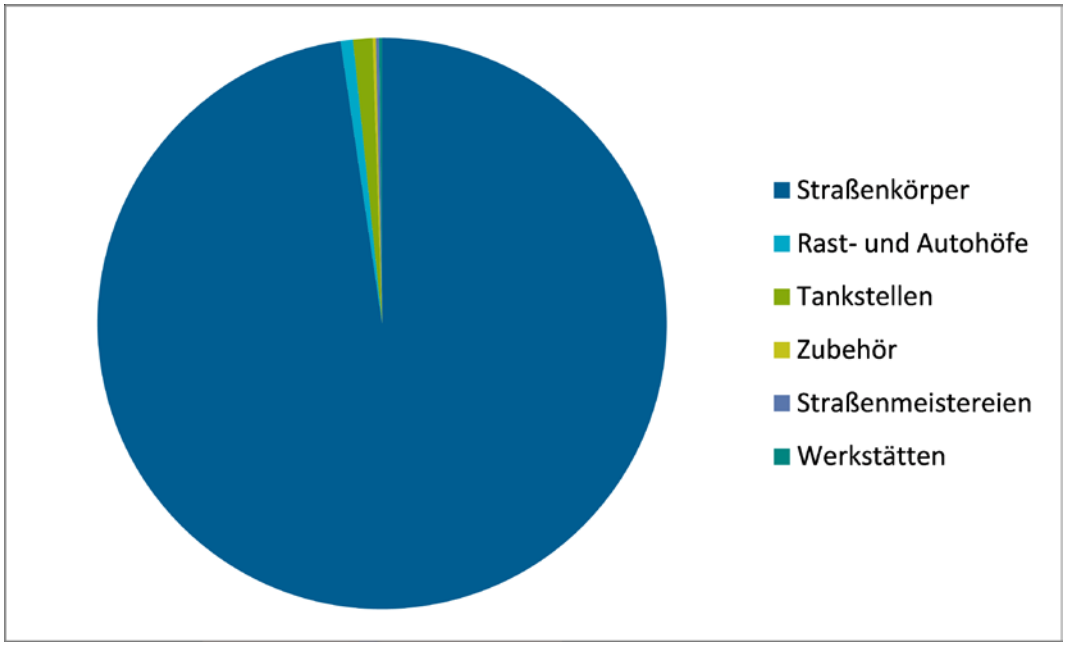



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Der Bau und Unterhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur verursacht im Referenzszenario im Jahr 2012 etwa 8,6 Mio. t $CO_2$-äq Emissionen. Wie in Abbildung 14 erkennbar ist hiervon der größte Anteil von 87 %, insgesamt 7,5 Mio. t THG-Emissionen pro Jahr, auf den Baukörper Straße zurückzuführen. An zweiter Stelle steht mit 6 % bzw. rund 0,5 Mio. t $CO_2$-äq Emissionen pro Jahr die Brücken, gefolgt vom Straßenzubehör, also Schilder, Ampeln, Leitplanken etc., mit 0,3 Mio. t $CO_2$-Äquivalentemissionen pro Jahr (3 %). Die anderen Komponenten tragen eine stark untergeordnete Rolle.

Auch die Betrachtung der Flächeninanspruchnahme spiegelt ein Ähnliches Verhältnis der Komponenten zueinander wieder. Von den insgesamt berechneten rund 432.000 ha versiegelter Fläche durch die Infrastrukturen des Straßenverkehrs sind rund 422.000 ha auf Straßenkörper zurückzuführen. Dies entspricht einem Anteil von 98 % (vgl. Abbildung 33).

Abbildung 33: Flächeninanspruchnahme (versiegelte Fläche) in ha über die Komponenten des Teilsystems Straßenverkehr

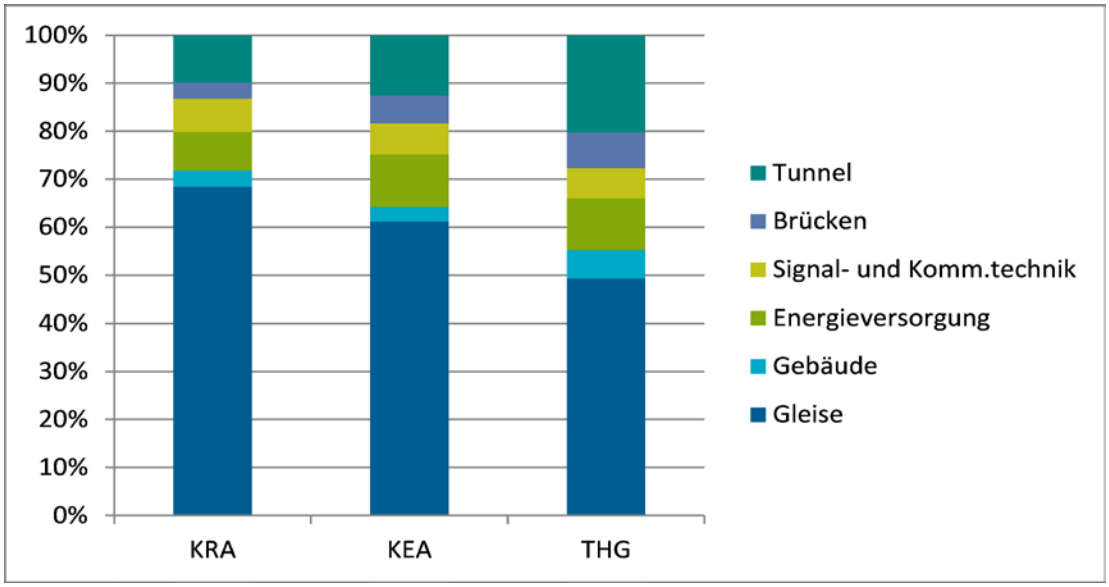



Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Teilsystem Schienenverkehr**

Bau und Unterhalt der Infrastruktur verursachen im Teilsystem Schienenverkehr im Jahr 2012 1,2 Mio. t $CO_2$-äq/a, haben einen Rohstoffaufwand von 17 Mio. t/a und benötigen 16 TJ/a an Primärenergie. Wie in Abbildung 14 deutlich zu erkennen, entfällt der dominante Anteil auf die Gleiskörper, abhängig vom Indikator zwischen 50 % und 70 %. Der Tunnelbau trägt 10 % bis 20 % Relevanz am Gesamtaufwand (vgl. Abbildung 34).

Abbildung 34: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Schienenverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario

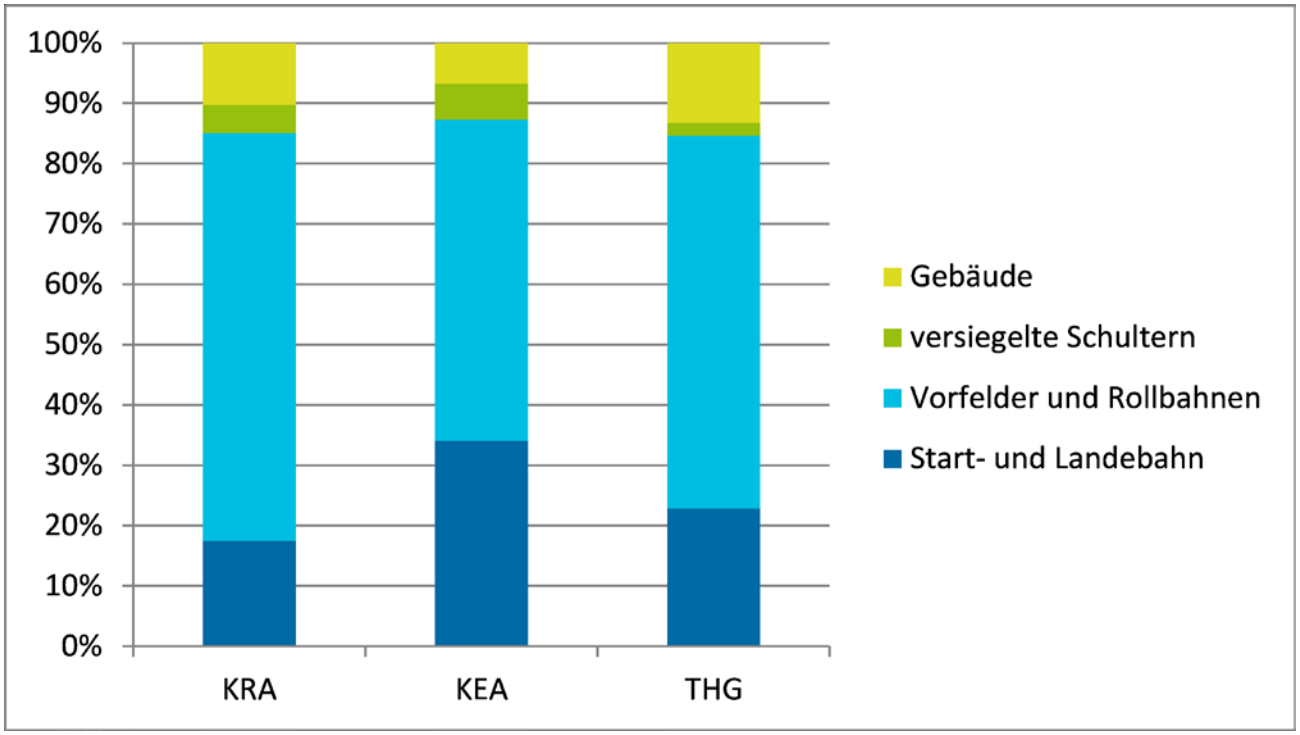



Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Teilsystem Luftverkehr

Der Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur im Luftverkehr beträgt 2,6 Mio. t/a und es werden 2,5 PJ/a Primärenergien aufgewendet. Bei den Treibhausgasemissionen sind es 0,2 Mio. t $CO_2$-äq/a emittiert. Wie in Abbildung 35 verdeutlicht ist ein großer Teil der Aufwendungen der Komponente Vorfelder und Rollbahnen zuzuordnen, je nach Indikator 53 % – 68 %. Start- und Landebahnen tragen stark abhängig vom Indikator zwischen 18 % und 34 % der Gesamtaufwendungen. Die versiegelten Schultern haben eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 35: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Luftverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario

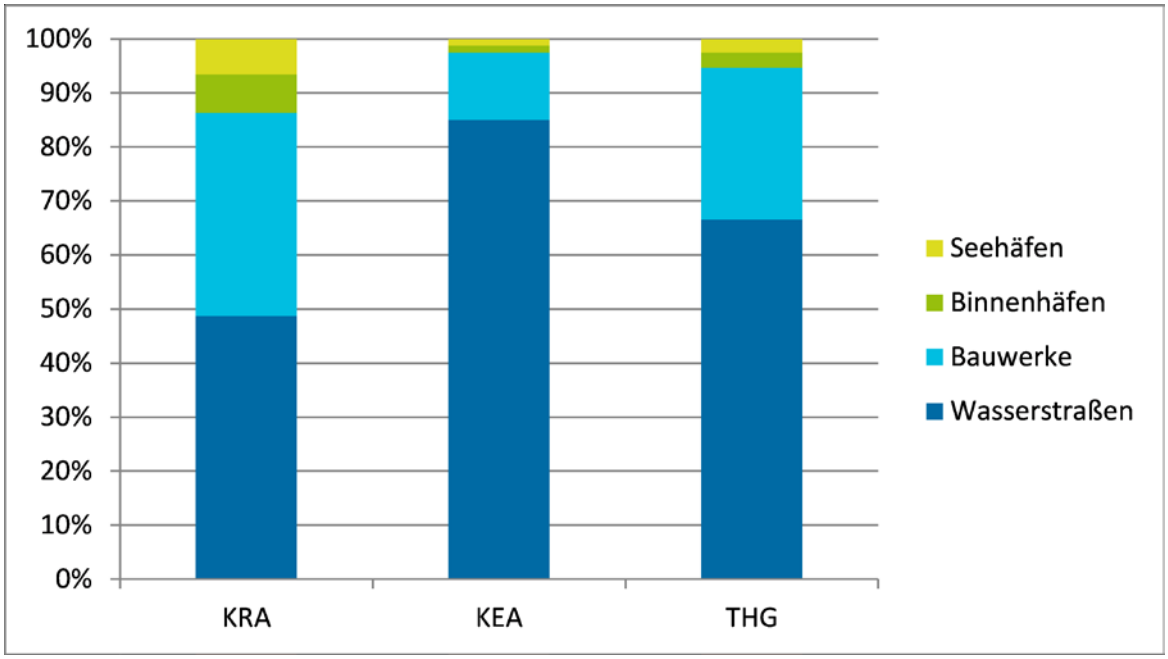



Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Teilsystem Wasserverkehr

Bau und Unterhalt der Infrastruktur verursachen im Teilsystem Wasserverkehr 0,8 Mio. t $CO_2$-äq/a, haben einen Rohstoffaufwand von 3,4 Mio. t/a und benötigen 20 PJ/a an Primärenergie. Wie in Abbildung 36 veranschaulicht sind Wasserstraßen und Bauwerke von übergeordneter Bedeutung im Teilsystem. Auffällig ist, dass der Anteil der Wasserstraßen am KEA mit 85 % deutlich über dem Anteil am KRA (49 %) und den Treibhausgasemissionen (67 %) liegt. Die Ursache dafür sind eingesetzte Materialien die mit einen geringen kumulierten Rohstoffaufwand und gleichzeitig einen hohen Energieaufwand verbunden sind (z. B. LDPE).

Abbildung 36: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten Teilsystem Wasserverkehr im Jahr 2012 im Referenzszenario

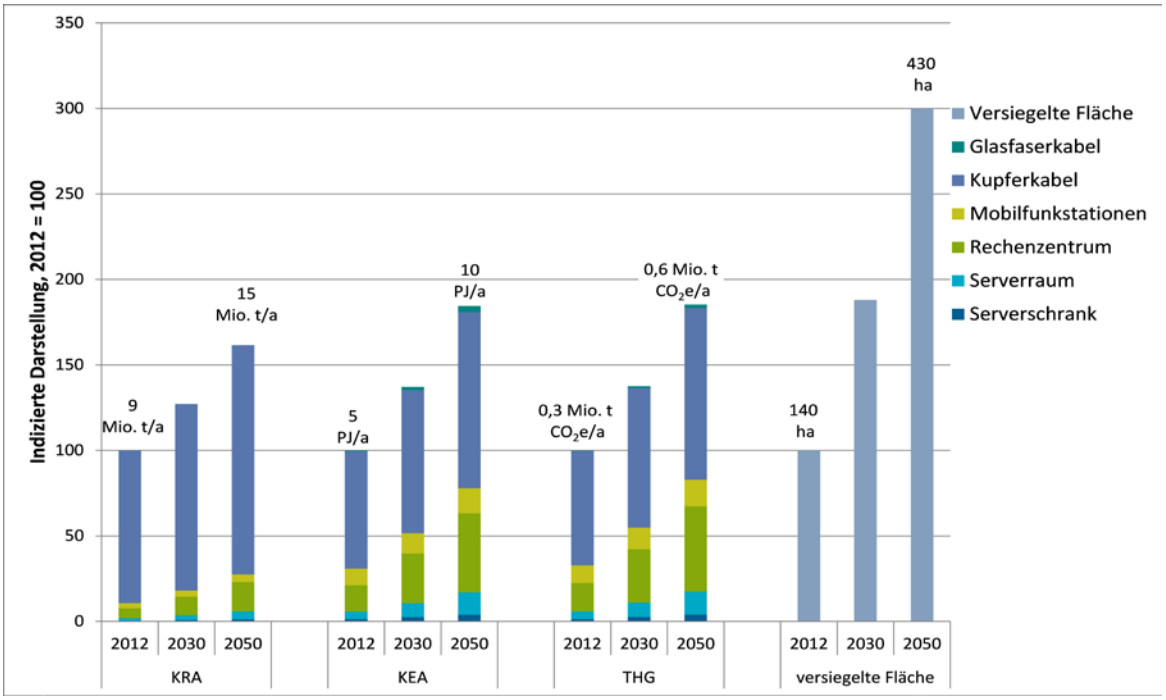



Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.2.4 Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse für den Infrastrukturbereich Informations- und Kommunikationstechnologie

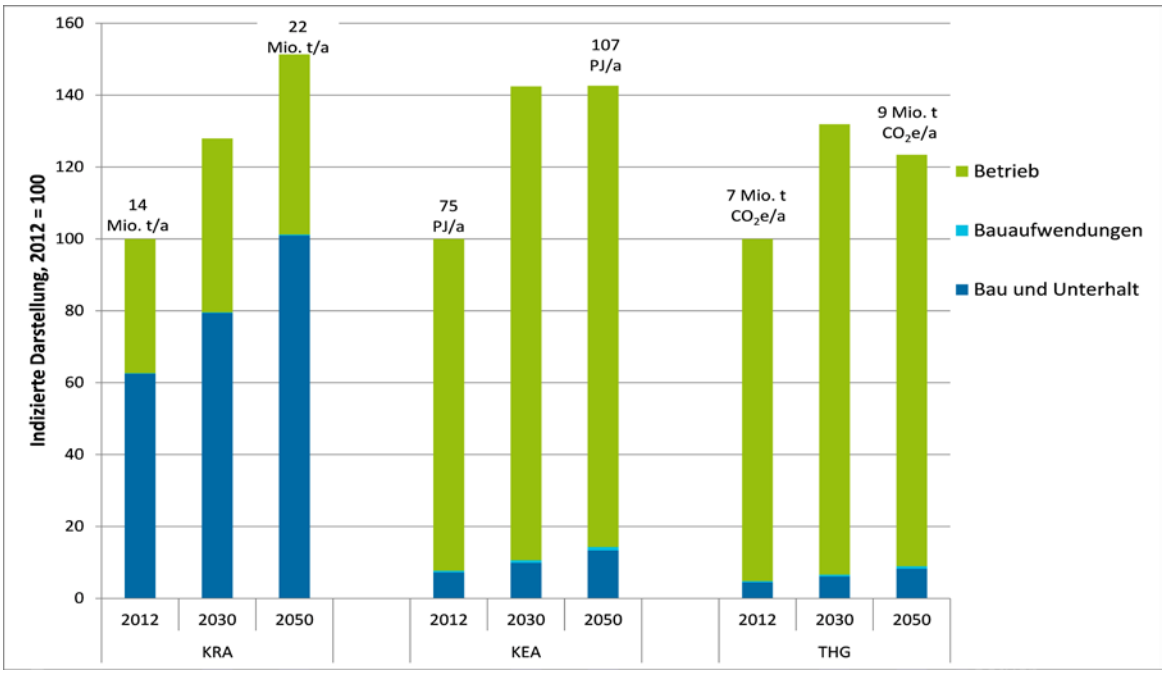
Abbildung 37 zeigt die Ergebnisse für die Indikatoren KRA, KEA und THG durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur sowie die versiegelte Fläche für den Infrastrukturbereich der IKT im Detail. Aus der indizierten Darstellung (2012 = 100) geht hervor, dass der Anstieg des KRA bis zum Jahr 2050 (6 Mio. t/a) etwa zu 73 % durch den Ausbau an Kupferkabeln bedingt ist. Beim KEA, der bis zum Jahr 2050 insgesamt um 5 PJ/a zunimmt, beträgt der Anteil der Kupferkabel lediglich 41 %, bei den THG-Emissionen sind es 39 %. Insgesamt nehmen KEA um 5 PJ/a (+85 %) und die THG-Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur um 300.000 t $CO_2$-Äquivalente pro Jahr (+85 %) zu. Am stärksten ist bis zum Jahr 2050 die Zunahme der versiegelten Flächen (+200 %) welche durch den Ausbau der Rechenzentren verursacht werden.

Abbildung 37: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt des Infrastrukturbereichs „Informations- und Kommunikationstechnologie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 38: Detailergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Referenzszenario für Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen Betrieb des Infrastrukturbereichs „Informations- und Kommunikationstechnologie“ für die Jahre 2012, 2030 und 2050 (indizierte Darstellung: 2012=100)

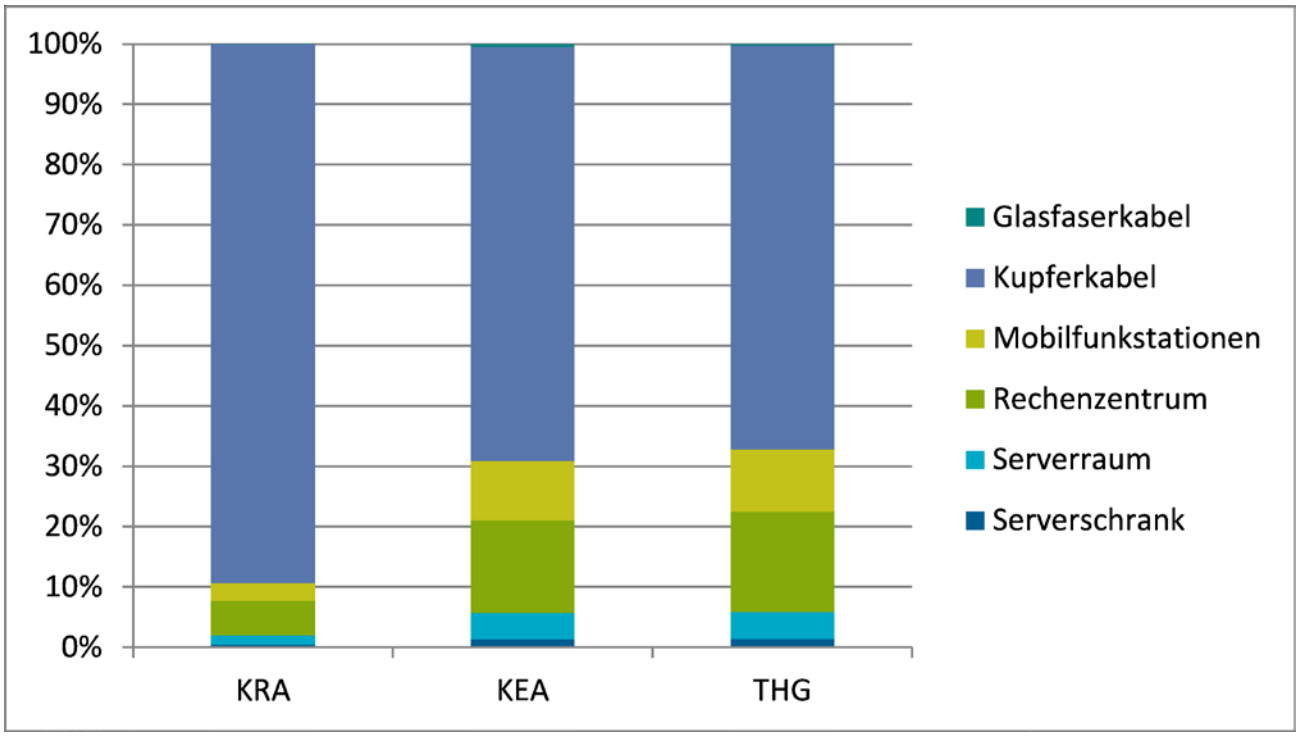



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Wie aus Abbildung 38hervorgeht ist bei der IKT-Infrastruktur ist in Hinblick auf den kumulierten Energieaufwand und die Treibhausgasemissionen der Betrieb von übergeordneter Bedeutung. Im Jahr 2012 verursacht der Betrieb der IKT-Infrastruktur 92 % des gesamten KEA und 95 % der Treibhausgasemissionen. Durch den sich verbessernden Strommix (geringerer Anteil Kohleverstromung) steigt der KEA trotz steigender Energieverbräuche im Betrieb nach 2030 nicht weiter an, die Treibhausgasemissionen fallen sogar von rund 10 Mio. t $CO_2$-äq im Jahr 2030 auf 9 Mio. t im Jahr 2050. Die Bauaufwendungen haben auf alle betrachteten Wirkungskategorien einen vernachlässigbaren Einfluss.

Abbildung 39 zeigt, für welchen Anteil an den betrachteten Wirkungskategorien durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur die einzelnen Komponenten der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur verantwortlich sind. Mit dieser Darstellung wird nochmals der große Anteil der Kupferkabel an der Ressourceninanspruchnahme verdeutlicht.

Abbildung 39: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt über die Komponenten des Infrastrukturbereichs „Informations- und Kommunikationstechnologie“ im Jahr 2012 im Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 1.3 Gesamtergebnisse der Analysen und Abschätzungen im Referenzszenario

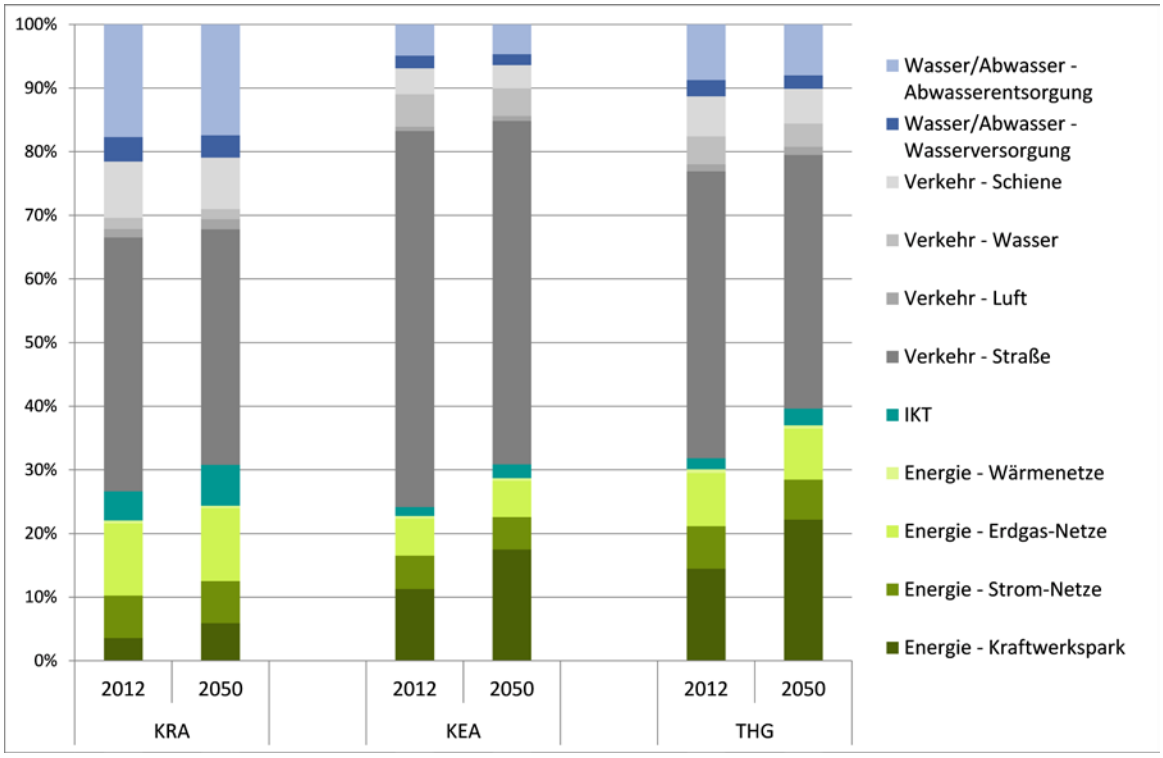
Die Gesamtergebnisdarstellung dient der Einordnung der einzelnen Teilsektoren zu einander und soll die besondere Ressourcenrelevanz einzelner Teilsektoren verdeutlichen.

Der kumulierte Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur über alle Teilsektoren beträgt im Jahr 2012 196 Mio. t/a. Der kumulierte Energieaufwand beträgt im Jahr 2012 391 Mio. PJ/a und die Treibhausgasemissionen liegen bei 19 Mio. t $CO_2$-äq/a. Bis zum Jahr 2050 steigt der KRA um 16 % auf 226 Mio. t/a, der KEA um 18 % auf 462 PJ/a und die THG-Emissionen um 22 % auf 23 Mio. t $CO_2$ äq/a.

Abbildung 40 verdeutlicht die starke Relevanz des Verkehrssektors, im speziellen der Straßeninfrastrukturen, auf die Ressourceninanspruchnahme durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur. Der An-

teil des Verkehrssektors am kumulierten Rohstoffaufwande beträgt 52 % (2012) bzw. 48 % (2050), am kumuliertem Energieaufwand 69 % (2012) bzw. 63 % (2050) und an den Treibhausgasemissionen 57 % (2012) bzw. 50 % (2050). Die Energieinfrastrukturen tragen insgesamt einen Anteil von 22 % (2012) bzw. 24 % (2050) des KRA, 23 % (2012) bzw. 29 % (2050) des KEA und 30 % (2012) bzw. 37 % (2050) an den THG-Emissionen. Die Infrastrukturen der Wasserver- und Abwasserentsorgung haben einen Anteil von insgesamt 22 % (2012) bzw. 21 % (2050) des KRA, 7 % (2012) bzw. 6 % (2050) des KEA und 11 % (2012) bzw. 10 % (2050) der THG-Emissionen. Im Gesamtvergleich ist der IKT-Sektor mit relativen Beiträgen von 5 % (2012) bzw. 6 % (2050) des KRA, 1 % (2012) bzw. 2 % (2015) des KEA und 2 % (2012) bzw. 3 % (2050) der THG-Emissionen sehr klein.

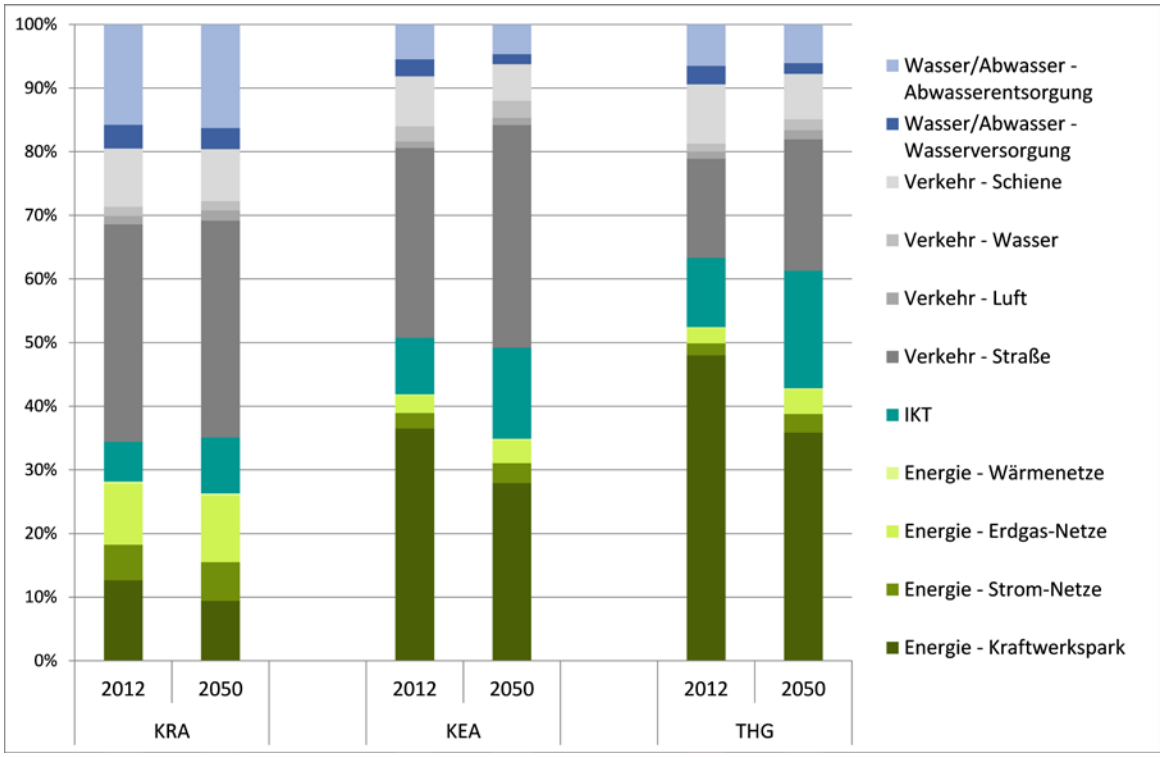
Abbildung 40: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur über die Komponenten der Teilsysteme in den Jahren 2012 und 2050 im Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Unter Einbezug der Bauaufwendungen und des Betriebes der Infrastruktur (vgl. Abbildung 41) verliert der Infrastrukturbereich Verkehr etwas an Relevanz, da hier die hohen Energieverbräuche im Energiesektor (Eigenverbrauch der fossilen Erzeugungsanlagen) und der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (Serverbetrieb) zu Buche schlägt. Besonders große Relevanz hat dies auf den KEA und die THG-Emissionen.

Abbildung 41: Prozentualer Vergleich der Indikatoren (THG, KRA, KEA) durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur über die Komponenten der Teilsysteme in den Jahren 2012 und 2050 im Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 1.4 Ergebnisse der Kostenabschätzung im Referenzszenario

Im Abwassernetz bleibt es im Referenzszenario bei den heute bekannten Strukturen. Leitungen werden am Ende ihrer Nutzungsdauer in konventioneller Weise ersetzt. Die Ersatzleitungen haben noch ihre volle Nutzungsdauer (angesetzt mit 80 Jahren), gegenüber einer durchschnittlichen Restnutzungsdauer im Bestand von 40 Jahren. Dadurch findet im Betrachtungszeitraum bis zum Jahr 2050 eine kontinuierliche Verjüngung des Bestandes statt. Auf eine der Nutzungsdauer der Leitungsnetze entsprechende lange Sicht führt der Entwicklungspfad jedoch wieder zu einer mit dem heutigen durchschnittlichen Alter vergleichbaren Altersstruktur zurück.

Der Wert des Anlagevermögens im bestehenden Leitungsnetz bleibt damit stabil. Die als Kosten zu berücksichtigenden Abschreibungen ebenfalls.

Entsprechend der Annahmen zur Entwicklung des Bestands an Abwasserinfrastruktur (vgl. Teil C Kapitel 1.1.2) findet jedoch ein Ausbau des Kanalnetzes in Trennkanalisation statt. Diese Erweiterungen führen in der Summe zu wachsenden Infrastrukturkosten. Parallel findet eine leichte Reduzierung der Anzahl der Abwasserbehandlungsanlagen statt, die für sich genommen auch niedrigere Kosten zur Folge hat. Die Anzahl anderer Bauwerke, z. B. zur Regenentlastung, steigt jedoch – mit entsprechend zunehmenden Kosten.

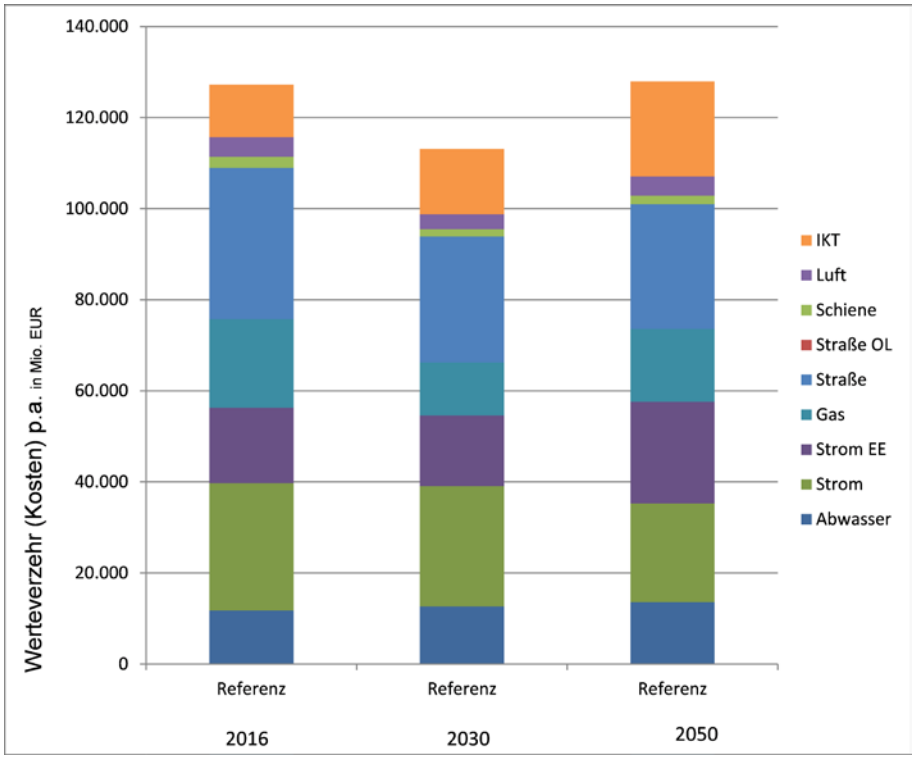
Für den Bereich Abwasser ist deshalb im Referenzszenario von leicht wachsenden Kosten auszugehen. Die Kostensteigerung liegt allerdings gemäß der vorgenommenen Schätzung in einer Größenordnung von jährlich weniger als einem halben Prozent.

Auch insgesamt bleiben die Kapitalkosten der betrachteten Infrastruktursysteme im Referenzszenario stabil. Dabei gleichen sich die unterschiedlichen Entwicklungstendenzen weitgehend aus. So steigen

die Kosten von Erzeugungsanlagen für Strom aus Erneuerbaren Energien aufgrund des Ausbaus in diesem Bereich im Betrachtungszeitraum erkennbar an. Gleichzeitig sinken die Kosten der konventionellen Stromversorgung. Auch die Kosten des Gasnetzes und des Straßennetzes sind 2050 voraussichtlich niedriger als heute. Ein deutlicher Anstieg der Kosten ist dagegen bei der die IKT-Infrastruktur zu erwarten.

Unter der Annahme, dass es keine wesentlichen organisatorischen oder technologischen Veränderungen im Betrieb der Infrastrukturen gibt, beispielsweise bei Wartungsmaßnahmen, ergeben sich Veränderungen der Betriebskosten im Wesentlichen durch einen veränderten Umfang der bereitgestellten Infrastruktur. Im Referenzszenario ist insofern insbesondere mit einem Anstieg der Betriebskosten bei der IKT- und der Erneuerbare Energien-Infrastruktur zu rechnen. Die schon beschriebenen Entwicklungstendenzen werden dadurch zwar verstärkt. Das Gesamtbild stabiler Kosten im Referenzszenario wird dadurch jedoch nicht in Frage gestellt.

Abbildung 42: Kapitalkosten im Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 2 Vier Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen

Dem zuvor analysierten Referenzszenario zur Entwicklung der technischen Infrastruktursysteme auf Basis „aktuell getroffener Maßnahmen“ werden nun normative Szenarien einer alternativen Infrastrukturgestaltung gegenübergestellt. Diese Fallstudien „ressourcenleichter Infrastrukturen“ wurden aufbauend auf

- dem Infrastrukturbestand in Deutschland im Jahr 2012,
- den sektorenspezifischen Untersuchungen,
- als plausibel erachteten strategischen Ansatzpunkten zur Beeinflussung der Ressourceninanspruchnahme durch die Infrastruktursysteme und auf
- durch Literaturrecherchen gestützte Annahmen über die weitere Entwicklung von Trends und Veränderungsprozessen in den Infrastruktursektoren entwickelt.

Die in Teil B dieses Berichts dargestellten Ergebnisse der SWOT-Analysen bilden die Grundlage der Erarbeitung der Fallstudien.

Bei der „Konstruktion" der Fallstudien waren mehrere **methodische Herausforderungen** (vgl. hierzu auch Teil A Kapitel 2) zu meistern:

- Die Einnahme einer sektorenübergreifende und systemische Perspektive, die insbesondere Kopplungen zwischen den Teilsystemen in den Blick nehmen soll, steigert die logische Komplexität des Gegenstands.
- Daraus ergibt sich die Herausforderung, einen Umgang mit der Komplexität und ihrer angemessenen Reduktion zu finden, ohne unterkomplex zu werden.
- Die Fallstudien bzw. Alternativszenarien sollen in ihrer Konfiguration mehr abbilden als die Implementation technischer Einzeloptionen. Hier kommt wieder der systemische Anspruch des Vorhabens zum Vorschein.
- Für den Bilanzierungsrahmen der Stoffstromanalyse stellt sich mit Blick auf den verfolgten Lebenszyklusansatz der Infrastrukturen die Herausforderung, Vergleichbarkeit zwischen den Sektoren und den Szenarien sicherzustellen. Während vergleichswiese einfach zu bestimmen ist, was in der Bauphase von Infrastrukturen in die Analyse eingeht, sind die Phasen der Nutzung und des Betriebs nicht eindeutig gleichermaßen über alle Sektoren hinweg zu bestimmen.

Folgende normative und methodisch-konzeptionelle **Rahmensetzungen** haben die Entwicklung der Fallstudien im Vorhaben angeleitet:

- Die Fallstudien bilden mögliche Gestaltungen („Szenen") künftiger Infrastrukturen im Jahr 2050 ab und werden normativ auf „Ressourcenleichtigkeit" hin gestaltet. Es geht nicht darum, möglichst wahrscheinliche Entwicklungen abzubilden.
- Die Funktionsfähigkeit der Infrastrukturen und die heute geltenden Prinzipien der Daseinsvorsorge werden mit den Fallstudien nicht in Frage gestellt.
- Weitere Varianten verschiedener Maßnahmenkombinationen in den Fallstudien können als „Szenaretten" abgebildet werden.
- Die Metaparameter wie etwa die Bevölkerungsentwicklung, das BIP etc. werden der Studie „Klimaschutz 2050" des Öko-Instituts (Repenning et al. 2015) entnommen. Um die Vergleichbarkeit von Referenzszenario und Fallstudien zu gewährleisten, werden diese über alle Szenarien hinweg gleich gehalten.

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen können sowohl die Sensitivität der getroffenen Annahmen über die Entwicklung der Infrastrukturbestände für das Ergebnis als auch die Relevanz einzelner Faktoren/Maßnahmen für Ressourcenleichtigkeit geprüft werden.

Die dargestellten Ergebnisse umfassen folgende Bereiche:

- Bau und Unterhalt der Infrastruktur: materialbedingte Auswirkungen durch Bau- und Instandhaltung unter Berücksichtigung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen;
- Bauaufwendungen: die mit dem Bau und der Instandhaltung der Infrastruktur verbundenen Energieverbräuche (Dieselkraftstoff und Strom);
- Betrieb der Infrastruktur: Energieverbrauch für den Betrieb der Infrastruktur (z. B. Pumpenergie, Eigenstromverbrauch der fossilen Erzeugungsanlagen).

Darüber hinaus werden teilweise auch die als „Nutzung" bezeichneten Auswirkungen der Stromerzeugung mit fossilen Erzeugungsanlagen dargestellt. Dieser Aspekt liegt außerhalb der festgelegten Systemgrenzen, stellt aber insbesondere in den Fallstudien, in denen eine Änderung an der Zusammensetzung des Kraftwerkparks unterstellt wird, eine sinnvolle Ergänzung dar.

## 2.1 Entwicklung der Fallstudien und der Berechnung der orientierenden Stoffstromanalysen

Im Ergebnis der für die einzelnen Infrastrukturteilsysteme separat durchgeführten SWOT-Analysen wurden die relevanten strategischen Ansatzpunkte zur möglichen Weiterentwicklung für jedes der zehn Teilsysteme identifiziert (vgl. Teil B Kapitel 3). Diese wurden jeweils in den entsprechenden Unterkapiteln „Ergebnisse der SWOT-Analyse“ und „Strategische Ansatzpunkte" aufgeführt und kurz umrissen. Da das primäre Ziel dieses Vorhabens darin besteht, auf Grundlage eines Vergleiches verschiedener Szenarien ressourcenleichter, zukunftsfähiger, umweltschonender Infrastrukturen Handlungsempfehlungen zu entwickeln, wurde bereits in den SWOT-Analysen der Blick explizit auf Fragen nach der Ressourcenleichtigkeit gerichtet (vgl. die Leitfragen für die Schritte der SWOT-Analysen).

Grundlegende Stellschrauben[59] der „Ressourcenleichtigkeit“, die die Überlegungen im Rahmen der SWOT-Analyse und für die sektorenübergreifende Bündelung von strategischen Ansatzpunkten zu Fallstudien geleitet haben, sind:

- eine Reduktion des Bestands an bzw. ein Verzicht auf Neubau von technischen Infrastrukturen. Dieser führt zu einem absoluten Rückgang des Bestands an Infrastruktur und damit zu einer Reduktion der Ressourceninanspruchnahme für Bau, Betrieb und Instandhaltung.
- eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Infrastrukturen. Diese führt zu einer (bilanziellen) Ressourcenleichtigkeit pro Jahr der Nutzung einer Infrastruktur.
- eine Erhöhung der Nutzungsintensität (z. B. Auslastung von EE-Erzeugungsanlagen). Diese ist geeignet, bei steigender Nachfrage auf weiteren Infrastrukturausbau zu verzichten.
- multifunktionale Nutzungen (z. B. Rohr-in-Rohr-Lösungen oder Gasnetze als Stromspeicher). Diese erhöhen ebenfalls die Nutzungsintensität oder die Nutzungsdauer.
- ein Einsatz von weniger und „leichteren“ Materialien (z. B. Glasfaser statt Kupfer im Bereich IKT, Sandwich-Bauweisen für PV-Anlagen auf Dächern). Dies trägt zur Ressourcenleichtigkeit bei, indem die spezifischen Materialkoeffizienten verändert werden. Dieser Ansatzpunkt kann im Rahmen der Siedlungswasserwirtschaft z. B. auch derart umgesetzt werden, dass technische Infrastrukturen (Kanäle, Rohre, Analgen) funktional durch „grün-blaue“ Infrastrukturen ergänzt werden (z. B. Vermeidung von Niederschlagswasserkanälen durch dezentrale Lösungen wie Versickerung auf Grünflächen).

Die Ergebnisse der Stoffstromanalyse des Infrastrukturbestandes 2012 (vgl. Teil C Kapitel 1), die die Ressourcenrelevanz der einzelnen Infrastruktursektoren, ihrer Teilsysteme und z. T. ihrer Systemkomponenten (Anlagen, Netze) ausdrücken, werden in die weiteren Überlegungen einbezogen. Zur Entwicklung der vier Strategiepakete werden die Ergebnisse der Teilsystem-Analysen nun zum einen weiter verdichtet. Zum anderen wird in einer sektorenübergreifenden Perspektive gezielt nach Möglichkeiten der Kopplung verschiedener Teilsysteme gesucht. Im Rahmen eines Team-internen Workshops wurde hierzu ein stufenweises Vorgehen gewählt, bei dem alle Infrastrukturbereiche schrittweise in Beziehung gesetzt wurden. Die folgenden Bearbeitungsschritte wurden dabei durchlaufen:

1. Systematische Auflistung der strategischen Ansatzpunkte

Die strategischen Ansatzpunkte wurden für die einzelnen Infrastruktursysteme separat und geordnet nach den vier Basisstrategien einer SWOT[60] im Überblick visualisiert. Dazu wurden im Workshop Me-

59 Über diese Stellschrauben können auch die Parameter (Faktoren) zur Berechnung der orientierenden Stoffstromanalyse angepasst werden.

60 Die vier Basisstrategien einer SWOT besteht in der Suche nach Lösungen zum Umgang mit Stärken – Chancen, Stärken – Risiken, Schwächen – Chancen und Schwächen – Risiken.

taplan-Wände und beschriftete Moderationskarten eingesetzt. Als Grundlage für die anschließenden Überlegungen wurden für die einzelnen strategischen Ansatzpunkte die maßgeblichen Elemente der SWOT-Analyse (Stärken/Schwächen, Chancen/Risiken) rekapituliert.

2. Identifizierung der Bezüge zu anderen Teilsystemen

Verschiedene Ansatzpunkte (bzw. die ihnen zugrunde liegenden Stärken und Schwächen) verweisen bereits auf Möglichkeiten einer infrastruktursystemübergreifenden Kopplung. Diese wurden systematisch erfasst und in Beziehung gesetzt. Ferner wurde nach strategischen Handlungsansätzen gesucht, die Auswirkungen über den jeweils betrachteten Infrastrukturteilbereich hinaus entfalten. Diese Zusammenhänge wurden identifiziert, diskutiert und die Karten entsprechend an den Metaplan-Wänden geordnet.

3. Bündelung zu Strategiepaketen

Strategische Handlungsansätze, zwischen denen logische, inhaltliche Bezüge festgestellt werden konnten, wurden zu „Strategiepaketen“ gebündelt (geclustert). Das heißt, die Karten wurden auf den Metaplan-Wänden in einem intensiven Diskussionsprozess im Workshop entsprechend sortiert und zusammen gruppiert. So ergab sich eine neue Ordnung der Karten nach ihren logischen Zusammenhängen und Wechselbeziehungen. Einzelne strategische Ansatzpunkte (z. B. „Hohe Flexibilität im Teilsystem Strom für Schritt-für-Schritt-Ausbau von Systemkopplungen nutzen“ aus dem Teilsystem Strom) finden sich in verschiedenen Strategiepaketen wieder. Diese Ansatzpunkte (Karten) wurden vervielfältigt und mehreren Clustern zugeordnet.

4. Systematisierung der Strategiepakete in Fallstudien

Ein Teil der strategischen Ansatzpunkte konnte wie oben beschrieben in einem interdisziplinären Diskussionsprozess zu vier logisch sinnhaften Strategiepaketen gebündelt werden, die im Weiteren zu Fallstudien (Szenarien) ressourcenleichter Infrastrukturen weiterentwickelt wurden. Dazu wurden die vier Strategiepakete in einem weiteren Schritt mit qualitativen Wirkungsgefügen und Interdependenzen der einzelnen Elemente/Faktoren hinterlegt.

Andere strategische Ansatzpunkte erwiesen sich als nicht geeignet bzw. nicht sinnvoll, in die vier identifizierten Fallstudien einzugehen. Diese Ansatzpunkte benennen jedoch häufig wichtige, eher flankierende und ermöglichende Rahmenbedingungen wie z. B. integrierte Planung, Finanzierung, Akzeptanz etc. Diese flankierenden Ansatzpunkte wurden entsprechend als ermöglichende oder je nach Ausprägung auch hemmende „Rahmenbedingungen“ erfasst.

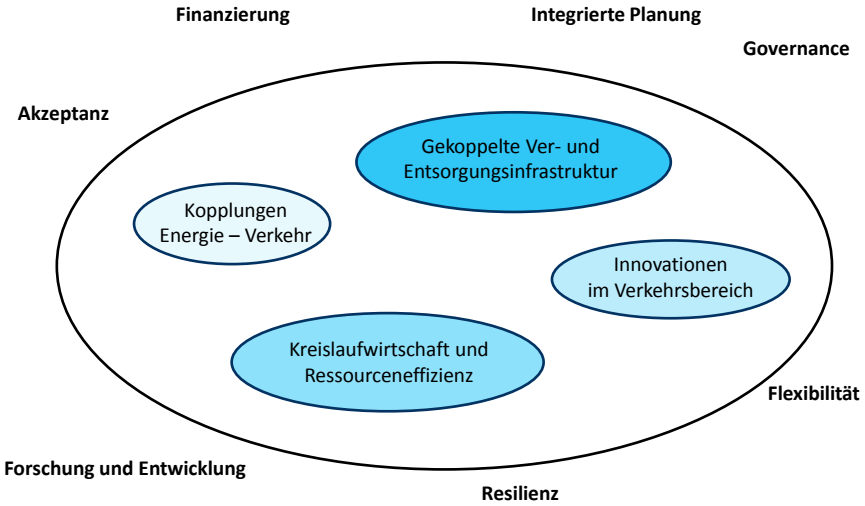
5. Benennung der Fallstudien

Der sachliche Gegenstand einer Fallstudie ergibt sich aus den Kopplungsmöglichkeiten und hier vor allem den technisch-institutionellen Optionen, die jeweils den einzelnen Ansatzpunkten und Strategiepaketen zugrunde liegen. Eine möglichst klare Benennung sollte einerseits die wesentlichen Inhalte charakterisieren und andererseits die Abgrenzung zwischen den Fallstudien erkennbar machen.

Im Ergebnis wurden folgende vier Fallstudien für die Entwicklung „ressourcenleichter, zukunftsfähiger Infrastrukturen“ entworfen (vgl. Abbildung 43):

1. Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen
2. Kopplung Energie – Verkehr
3. Innovationen im Verkehrsbereich (u. a. IKT-basiert)
4. Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz

Abbildung 43: Vier Fallstudien[61] und Rahmenbedingungen




Quelle: Difu/Öko-Institut.

In den weiteren Schritten der Arbeiten zu den Fallstudien wurden die Wirkungsgefüge nun mit technischen und organisatorischen Maßnahmen/Optionen unterfüttert. Dazu war eine Abschätzung der Potenziale und Effekte der einzelnen Maßnahmen/Optionen im Kontext des jeweiligen Wirkungsgefüges notwendig. Soweit wie möglich wurden hier Quantifizierungen vorgenommen. Diese wurden basierend auf möglichst plausiblen Annahmen über künftige Entwicklungen und Trends entwickelt. Aufbauend auf diesem sowohl qualitativen als auch quantitativen Vorgehen wurden im Weiteren für die vier Fallstudien orientierende Stoffstromanalysen erstellt. Damit ließen sich Abschätzungen anstellen, welche Auswirkungen deren Umsetzung auf die verschiedenen Analyseparameter (insbesondere den kumulierten Ressourcenaufwand (KRA), den kumulierten Energieaufwand (KEA) und die Flächeninanspruchnahme) haben könnte.

## 2.2 Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“

### 2.2.1 Das Szenario im Jahr 2050)

Ausgehend vom Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß den Klimaschutz- und energiepolitischen Zielen der Bundesregierung (vgl. Bundesregierung 2010) und den im Stromsystem benötigten Flexibilitätsoptionen [St 8][62] einerseits sowie den absehbaren (situationsweisen) Überschüssen bei der Er-

61 Ein zentrales Ergebnis der Stoffstromanalyse des heutigen Infrastrukturbestandes ist, dass im Verkehrssektor (und hier wiederum insbesondere dem Straßenverkehr) ein Großteil der Ressourceninanspruchnahmen (Material, Energie, Fläche) anfällt. Vor dem Hintergrund seiner besonderen Ressourcenrelevanz ist die Bearbeitung von zwei Fallstudien, die sich gezielt auf den Verkehrssektor ausrichten, angemessen.

62 Die folgenden Codierungen verweisen auf die entsprechenden, an den jeweiligen Stellen relevanten strategischen Ansatzpunkte, wie sie in Teil B Kapitel 3 eingeführt sind.

zeugung und Einspeisung[63] von erneuerbarem Strom wird nach Optionen gesucht, wie bestehende Infrastrukturen (etwa als Speicher oder Leitungsträger) weiter genutzt werden können. Der Ausbau der erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung eröffnet prinzipiell die Chance, erneuerbaren Strom als universellen „Energieträger" auch in anderen Sektoren zu nutzen [St 1]. Die hohe Flexibilität im Stromsektor bietet die Möglichkeit, Kopplungen mit anderen Infrastruktursystemen Schritt für Schritt auf- und auszubauen [St 2, IKT 5]. Hier bestehen also Kopplungspotenziale, die noch dazu im Rahmen eines Umgestaltungsprozesses iterativ entwickelt, angepasst und weiterentwickelt werden können [St 5].

Blickt man nun auf die anderen Energieversorgungsteilsysteme Wärme und Gas, zeigt sich, dass hier Infrastrukturen bestehen, die als Speicher eine Rolle in den benötigten Flexibilitätsoptionen für die Stromversorgung spielen könnten (vgl. Agora Energiewende 2014b, 2014c; Bauknecht et al. 2014; UBA 2014). Im Zuge des Klimawandels und der energieeffizienteren Bauweise bzw. energetischen Sanierung im Gebäudebestand sinken die Raumwärmebedarfe absehbar (vgl. Öko-Institut/Fraunhofer 2014; UBA 2014; PWC 2015). Ferner gehen verschiedene Energieszenarien davon aus, dass Raumwärme zunehmend strombasiert (Wärmepumpe) bereitgestellt wird (vgl. UBA 2014). Damit sinkt der Bedarf an netzgebundener Gas- und Wärmeversorgung. Diese beiden Infrastrukturen dürften, zumindest in Teilbereichen, Auslastungsrisiken ausgesetzt sein. Zugleich ergeben sich durch die geringeren Bedarfe an Raumwärme frei werdende Kapazitäten in der Gas- und Wärmeinfrastruktur, die als Energiespeicher (power-to-gas/power-to-heat Technologie) genutzt werden können [G 4]. Und das Gasnetz ist in gewissem Rahmen flexibel genug (d. h. bis zu bestimmten Mischungsverhältnissen), Gase verschiedener Herkunft und Kondition (Erdgas, synthetisches Methan, Wasserstoff) aufnehmen und transportieren zu können [G 1] (vgl. Antoni et al. 2015). Damit ließen sich – selbstverständlich mit notwendigen baulich-technischen Anpassungen – bestehende Netze und Anlagen weiternutzen und betreiben. Dementsprechend könnten ein multifunktionaler Einsatz und die Weiterverwendung bestehender Gasnetze und -anlagen Synergien zum Stromsektor heben und wechselseitig Auslastungsrisiken (Gasnetze) reduzieren bzw. die Nutzung bestehender Infrastrukturen intensivieren [G 2] (z. B. EE-Erzeugungsanlagen).

Vergleichbares gilt für Wärmenetze. Auch sie bieten Speicherkapazitäten, um EE-Überschüsse aufzunehmen [Wä 1] (vgl. Agora Energiewende 2014c). Perspektivisch kann auch über Kopplungen mit Kälteanwendungen bzw. Kältenetzen nachgedacht werden. Die Nutzung existierender Speicher wie z. B. Gasspeicher (power-to-gas) und Wärmespeicher (power-to-heat) trägt dazu bei, notwendige Flexibilitäten im Stromsystem anzupassen und zugleich den Ausbau von ressourcenintensiven (Strom-) Speicherkapazitäten (Batterien) möglichst zu reduzieren.

Da Gas- und Wärmenetze stärker als die Stromversorgung lokal strukturiert sind, sind insb. auf regionaler und lokaler Strom-Verteilnetzebene Smart Grids[64] für optimiertes Lastmanagement und das Ausbalancieren der Einspeisung von Strom sowie der (regionalen) Strombedarfe und Speicherkapazitäten erforderlich [Wä 2] (vgl. Antoni et al. 2015; Peter 2013; Agora Energiewende 2014c).

Die Strombedarfe verweisen auf ein weiteres Infrastrukturteilsystem, das häufig rund 25 % des kommunalen Energiebedarfs ausmacht: die Abwasserentsorgung. Die Siedlungswasserwirtschaft (insb. Abwasser) kann – wenn auch eher in begrenztem Rahmen/Kapazitäten – Beiträge zum Gelingen der

63 Unter Gesichtspunkten der Ressourcenleichtigkeit und der Wirtschaftlichkeit ist eine möglichst optimale Auslastung der Infrastrukturen anzustreben Daher sollte das Abregeln von EE-Anlagen etwa an Starkwindtagen möglichst reduziert werden.

64 Die Basis von Smart Grids und anderen „smarten" Lösungen bilden IKT-basierte Steuerungen und Datenaustausch. Damit ist mit der technisch notwendigen weiteren Digitalisierung in den Sektoren auch das Thema Datensicherheit und Resilienz angesprochen. Bspw. eröffneten Smart-Meter für Strom Möglichkeiten für kosten- (Betrug) und sicherheitsrelevante (Manipulation) Eingriffe in die Infrastrukturen.

Energiewende leisten, wenn sie bewusst z. B. in das regionale Lastmanagement auf Verteilnetzebene eingebunden wird[65] [AW 1]. Trinkwasserseitig wird Strom insbesondere für den Betrieb von Pumpen in der Wasserförderung und -transport/-verteilung benötigt. Abwasserseitig sind insb. die Kläranlagen als Energieverbraucher aber auch als Energieproduzenten (Klärschlammvergärung und Biogasproduktion) und -speicher von Interesse (ATT et al. 2015; VKU 2012; UBA 2009; Parsons 2012). So kann durch die Steigerung der Energieeffizienz insb. auf den Abwasserbehandlungsanlagen z. B. durch Umstellung auf anaerobe Verfahren der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden. Eine integrierte Betrachtung von Trink- und Abwassersystemen könnte ggf. hier Lastmanagementpotenziale heben[66] und bei einer organisatorischen Integration weitere Synergien erschließen (etwa indem Betriebsabläufe optimiert und Organisationseinheiten z. B. in der Verwaltung zusammengelegt werden können). Neben der Verbindung des Abwasser- und Energiesektors auf Basis der Biogasproduktion aus Klärschlammvergärung und ggf. Ko-Substraten sowie der Verbrennung im BHKW auf der Kläranlage zur Erzeugung von Strom und Wärme (verbreiteter Stand der Technik) werden auch Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung aus dem Abwasserstrom diskutiert und z. T. umgesetzt [AW 1] (vgl. Winker et al. 2014; Grazer Energieagentur 2007). Wärme kann dem Abwasser dezentral im Block, semizentral im großen Kanal oder zentral auf der Kläranlage entzogen werden. Jede Variante hat ihre spezifischen Voraussetzungen (z. B. nahe gelegene Wärmeabnehmer) und Vor- bzw. Nachteile (z. B. herrscht im großen Druckkanal ein großer und stetiger Abwasservolumenstrom für die Entnahme von Wärme, jedoch sind aufwändige bauliche Maßnahmen im Kanal notwendig und die räumliche Nähe einer Wärmesenke ist nicht immer gegeben; bei dezentralen Lösungen sind die Volumenströme bei etwas höherer Temperatur – Nähe zur Quelle – unstetig und die Energiepotenziale insgesamt geringer; die Wärmeabnahme findet im Gebäude/Block statt; dezentrale Wärmerückgewinnungsanlagen können auch mit Grauwasserrecycling-Anlagen kombiniert werden) [AW 2, 3].

Die Tendenz, Abwassersysteme als qualifizierte Trennsysteme (d. h. Trennung häuslicher Abwasser von Regenwasser) anzulegen bzw. um/-auszubauen, kommt der Einführung von Wärmerückgewinnung im Kanal entgegen. Denn das wärmere häusliche Abwasser wird in Trennsystemen nicht mit dem kälteren Niederschlagswasser vermischt. Die Trennung des Niederschlagswassers vom Abwasserstrom wird als grundsätzliches Prinzip im Wasserhaushaltsgesetz (WHG § 55 Abs. 2) gefordert und durch Maßnahmen zur ortsnahen Versickerung gefördert/erleichtert. Damit werden graue/technische Infrastrukturen (Kanäle) mit „grünen Infrastrukturen“ (Gründächer, Grünflächen zur Versickerung etc.) kombiniert bzw. ergänzt und im Extremfall sogar ersetzt (Nickel et al. 2015). Andererseits nimmt in Siedlungsgebieten, in denen bei der Umstellung auf ein Trennsystem parallele Kanäle gebaut werden müssen, die Länge des Kanalnetzes zu und damit die Ressourceninanspruchnahme bei Bau, Betrieb und Wartung.

Abwasserwärme oder auch Abwärme aus Server-/Rechenzentren (IKT) können als Wärmequellen begriffen werden, die in einer ressourcenleichten und effizienten Infrastruktur nach Möglichkeit gehoben werden. Die Wärme im Abwasser sollte also „geerntet“ und in die Netze eingespeist werden. Dazu ist in den existierenden Fern- und Nahwärmenetzen gewöhnlich eine Senkung der Vor- und Rücklauftemperatur (ca. 40°C Vorlauf) nötig, um dezentrale, niederkalorische Wärmequellen, d. h. mit in der Regel niedrigeren Temperaturen, in die Netze integrieren zu können. Auch die Wärmeeinspei-

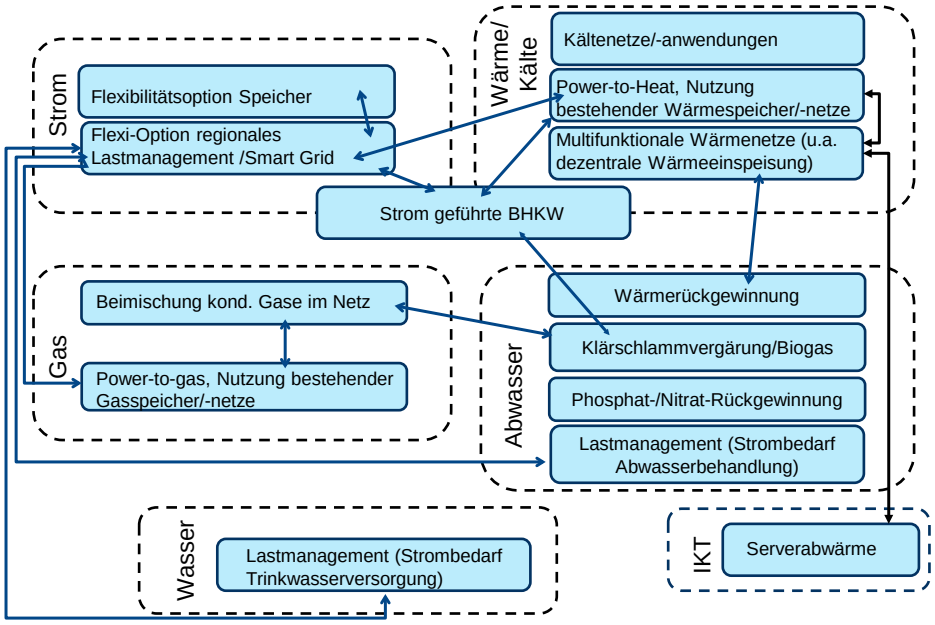
65 Vgl. hierzu das Vorhaben enWasser – Erschließung eines Lastmanagementpotenzials in der Wasserversorgung zur Integration erneuerbarer Energien (www.enwasser.net) oder für die Abwasserseite das Vorhaben „Kläranlagen als Energiepuffer für Stromnetze“ (KEStro) (http://www.kestro.de).

66 Firmen bieten bereits Systemplattformen an, die der Steuerung von dezentralen Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speicheranlagen dienen. In diesen virtuellen Kraftwerken der Abwasserentsorgung können Pumpen, Klärgas-betriebene BHKW, Notstromanlagen, Anlage der Wärmeversorgung und Schlammbehandlung zusammengebunden werden (Lessner 2015, S. 27).

sung auf Basis erneuerbarer Energien (Power-to-Heat) stellt in diesem Zusammenhang eine wichtige Option dar (Wä 1, 2).

Die beschriebenen Zusammenhänge[67] gekoppelter Stadttechnik sind in Abbildung 27 dargestellt.

Abbildung 44: Wirkungsgefüge der Fallstudie „Intelligent gekoppelte Stadttechnik“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die gekoppelten Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen im Jahr 2050 zeichnen sich dadurch aus, dass folgende Stellschrauben für Ressourcenleichtigkeit konsequent umgesetzt wurden:

- Verzicht auf Ausbau von technischen Infrastrukturen (und Nutzung bestehender Infrastrukturen, Bsp. Netze als Speicher)
- Verlängerung der Nutzungsdauer (etwa indem unrentierliche Gasnetze als Speicher genutzt werden)
- Erhöhung der Nutzungsintensität (durch Lastmanagement)
- Multifunktionale Nutzungen
- Einsatz von weniger und „leichteren“ Materialien (z. B. im Sinne eines Ersatzes von „grauer“ (technischer) durch „grüne/blaue“ Infrastrukturen z. B. im dezentralen Regenwassermanagement mit Versickerung auf Grünflächen anstelle der Ableitung in Kanälen)

Die vielfältigen Kopplungen und damit einhergehenden Interdependenzen und Stoffströme zwischen den Infrastruktursystemen lassen vermuten, dass Koordinationsbedarfe in nicht unerheblichem Umfang bestehen. Abstimmung und Koordination zwischen den Infrastruktursystemen – und damit letztlich zwischen den die Systeme betreibenden und nutzenden Akteuren – ist dabei nicht nur im laufenden Betrieb, sondern schon in der Planung (sowohl für Ersatz- und Umbaumaßnahmen als auch in der Erweiterung) erforderlich. Manche der genannten Optionen ergänzen sich, andere können sich aber

67 Die Zusammenhänge sind rein qualitativer Art und geben keine quantitativen Potenziale (Kapazitäten, Leistung in kWh, o.Ä.) wieder.

auch durchaus in ihrer Effizienz und Wirtschaftlichkeit negativ beeinflussen. Damit geraten in diesem Strategiepaket die flankierenden Ansatzpunkte und Rahmenbedingungen wie etwa integrierte Planung von Stadtentwicklung und Infrastrukturen, Governance oder Akzeptanz in den Blick.

Die These liegt nahe, dass, um die Kopplungspotenziale (Wärme, Abwasser, Gas, Strom) und Ressourceneffizienzpotenziale strategisch angehen und nutzen zu können, ein bewusstes lokales Management der Anpassungs- und Weiterentwicklungsmaßnahmen notwendig ist, in dem auf Basis lokaler Governance-Strukturen eine sektorenübergreifende, integrierte Planung und Steuerung ermöglicht wird (TW 1, 5, AW 5, St 6, Wä 2, 4, 5). Diese Koordination der gekoppelten Systeme wird räumlich wie institutionell auf verschiedenen Ebenen ansetzen müssen. Kommunen, kommunale Unternehmen und andere Akteure werden nur vor Ort die Koordination übernehmen können und müssen. Zugleich werden auf nationaler Ebene Gesetze und Institutionen notwendig sein, die das Zusammenspiel der gekoppelten Systeme regeln und überwachen.

Das Strategiepaket „intelligent gekoppelte Stadttechnik“ lässt sich in folgendem Bild einer deutschen Kommune im Jahr 2050 resümieren:
Die stadttechnischen Infrastrukturen (Energie, Wasserwirtschaft) wurden konsequent gekoppelt und auf Multifunktionalität (Netze als Speicher und polivalente Stränge) hin ausgelegt. Dadurch konnten vielfältige Energie- und Effizienzpotenziale erschlossen werden.
Die integrierte Stadt- und Infrastrukturplanung hat weitestgehend auf den Neubau von technischen Infrastrukturen verzichtet. Stattdessen wurden die bestehenden Netze und Anlagen konsequent weiterentwickelt und genutzt.
Ab 2030 stellte sich durch rückläufige Raumwärmebedarfe verbreitet eine sinkende Auslastung der Gasversorgungsinfrastruktur und der Wärmenetze ein. Die dadurch entstehenden Kapazitäten konnten sukzessive als Speicherpotenzial für EE-Strom (Flexibilitätsoption) erschlossen werden.

### 2.2.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen

Zur besseren Übersichtlichkeit wurde die Fülle der Optionen bzw. Maßnahmen, die in dieser Fallstudie beispielhaft zur Implementation kommen, verschiedenen Bereichen und Dimensionen von Infrastruktursystemen zugeordnet :

Maßnahmen im Bereich „Erzeugung“

- konsequenter Ausbau erneuerbarer Energien (z. B. 80 % EE in der Stromversorgung bis 2050): insbesondere Windkraft und PV-Anlagen (weitere Optimierungen und Effizienzsteigerungen (positive Lernkurveneffekte) sowie Kostenreduktion bei beiden Erzeugungsarten wahrscheinlich) (vgl. Agora, Fraunhofer-ISE 2015, Kost 2013)
- unter Flexibilitätsbedarfen optimierter Mix Erneuerbarer Energien und Anlagenkonfigurationen: Schwachwindanlagen, die PV-Ausrichtung, Biogas (z. B. Kläranlagen)
- Optimierung bzw. Steigerung der Wirkungsgrade bei Kraftwerken und Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Gas (Biogas, Wasserstoff, Methan) (vorübergehend auch konventioneller Art)
- Optimierung der Kläranlagen zur Gewinnung von Klärgas/Methan (Schwarzwasser-/Klärschlammvergärung, Zugabe von Ko-Substraten)

Maßnahmen im Bereich „Netze“

- Grundsätzlich ist hier eine Abwägung zwischen Stromnetzausbau und anderen Maßnahmen wie Lastmanagement und Speicherkapazitäten notwendig.
- Ausbau regionaler Strukturen auf der Stromverteilnetzebene
- Realisierung von Smart Grids

- Gasnetze: Erhaltung und ggf. Anpassung bestehender Gasnetze zur Aufnahme von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff und Methan (Mischung konditionierter Gase verschiedener Herkunft)
- Wärmenetze: Senkung der Vor- und Rücklauftemperatur (ca. 40°C Vorlauf) in Wärmenetzen zur Integration diffuser/dezentraler Wärmequellen (Bsp. Abwasserwärme, IKT-Server-Abwärme, industrielle Abwärme) mit niedrigeren Temperaturen und der Wärmeeinspeisung auf Basis erneuerbarer Energien

Maßnahmen im Bereich „Lastmanagement und Speicher“

- Ausbau von Smart Grids für optimiertes Lastmanagement (Einbinden von Großverbrauchern aus Industrie und Kommune und dezentraler Erzeugung)
- Dezentrale Regelenergie; „Schwarmstrom“[68] Bsp. Lichtblick.
- Möglichst geringer Ausbau von (Strom-)Speicherkapazitäten (Batterien) und Nutzung existierender Speicher wie z. B. Gasspeicher (Wasserstoff, synthetisches Methan; power-to-gas) und Wärmespeicher (power-to-heat)
- Speicherfunktion der E-Mobilität (vgl. Strategiepaket 2)

Maßnahmen im Bereich „Energie- und Ressourceneffizienz“

- Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebestand (Wärmebedarfe) (vgl. Strategiepaket 4)
- Dezentrales, nicht-leitungsgebundenes Regenwassermanagement[69]: Versickerung und naturnahe Ableitung sauberen Regenwassers zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Abwassersystem
- Abwasserwärmenutzung
- Umstellen von aerober auf anaerobe Abwasserbehandlung zur Steigerung der Energieeffizienz von Kläranlagen

Maßnahmen im Bereich „Governance“

- Integrierte Stadtplanung und Planung der Energie- und Wasserinfrastrukturen auf kommunaler Ebene
- „Smart Grids“ auf Akteursebene vor Ort zur Koordination der Planung und Betrieb u.a. zum effektiven Lastmanagement (Netzwerk zwischen lokalen Energieversorgern, Siedlungswasserwirtschaft und Wohnungswirtschaft)

### 2.2.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie

Nicht alle der zuvor genannten Optionen und Maßnahmen können für die Berechnungen im Rahmen der orientierenden Stoffstromanalyse mit Daten unterlegt und operationalisiert werden. Für einzelne Maßnahmen kann die Wirkung auf Ressourcenleichtigkeit nicht quantifiziert bzw. allenfalls in empirischen Studien fallweise bestimmt werden. Vor dem Hintergrund der hohen Aggregationsebene der Analysen im Rahmen von RELIS wurden aus den o. g. Optionen und Maßnahmen folgende Annahmen zur Entwicklung der Infrastrukturbestände abgeleitet:

68 Mit einer IT-gesteuerten Plattform wird ein Pool von Mini-Blockheizkraftwerken so gesteuert und „zusammen gebunden“, das dieser „Schwarm“ von kleinen Erzeugungsanlagen Energie zur Stabilisierung der Stromnetze liefern kann. (vgl. https://www.lichtblick.de/medien/news/2015/04/15/schwarmstrom-f %C3 %BCr-einen-stabilen-puls-im-stromnetz-lichtblick-liefert-regelenergie-aus-mini-kraftwerken).

69 Möglich wäre auch, Regenwasser zu Betriebswasser aufzubereiten und damit die Trinkwasserversorgung zu „entlasten“.

- Durch die Umstellung auf anaerobe Abwasserbehandlungstechniken wird eine verstärkte Nutzung von Biogas möglich, wodurch die Anzahl der BHKW (auf Kläranlagen) um knapp 30 % bis 2050 im Vergleich zum Referenzszenario zunimmt.
- Durch drei Maßnahmen bzw. Annahmen lassen sich im Rahmen dieser Fallstudie Kapazitäten bei der fossilen Energieerzeugung einsparen: 1) die schon zusätzliche Energie aus der Biogaserzeugung, 2) die konsequente Nutzung der Wärmepotenziale im Abwasser durch den Einsatz von Wärmetauschern und 3) den künftig geringeren Wärmebedarf. Die Einsparungen durch den geringeren Wärmebedarf werden hierbei über die neu zu bauenden KWK-Kraftwerke bis 2050 im Referenzszenario berechnet. Werden diese nicht mit Wärmekopplung ausgelegt, sondern als reine Energieerzeuger ausgelegt, steigt die Effizienz der Stromerzeugung. Die möglichen Einsparungen und erschlossenen Erneuerbaren Energiequellen (Biogas aus Klärschlamm und Abwasserwärme) werden durch eine Reduktion bei den Kohlekraftwerken und primär Braunkohlekraftwerken realisiert. Somit kann die installierte Leistung bis 2050 um 41 % bei den Braunkohlekraftwerken und 1 % bei Steinkohlekraftwerken reduziert werden.
- Aufgrund der Vernetzung der Systeme wird jedoch ein stärkerer Kommunikationsbedarf zwischen den Systemen angenommen. Für die IKT Infrastrukturen wird daher ein Zuwachs an großen Rechenzentren um 50 % angenommen.

### 2.2.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse im Fallbeispiel „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ sind in Tabelle 6 und den folgenden Grafiken abgebildet. Dabei wird nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 differenziert.

Tabelle 6: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau- und Unterhalt | Verkehr | 101 | 107 | 109 | 270 | 285 | 290 | 11 | 12 | 12 |
| | IKT | 9 | 12 | 15 | 5 | 8 | 11 | 0 | 0 | 1 |
| | Wasser/Abwasser | 42 | 46 | 47 | 27 | 29 | 30 | 2 | 2 | 2 |
| | Energie | 43 | 51 | 55 | 89 | 124 | 132 | 6 | 8 | 9 |
| | *Zwischensumme* | **196** | **216** | **226** | **391** | **446** | **462** | **19** | **22** | **23** |
| Bau-aufwendungen | Verkehr | 4,2 | 3,1 | 1,7 | 54,5 | 45,1 | 25,6 | 5,5 | 4,2 | 2,2 |
| | IKT | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,35 | 0,54 | 0,77 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| | Wasser/Abwasser | 0,14 | 0,12 | 0,07 | 1,95 | 1,82 | 1,23 | 0,19 | 0,16 | 0,10 |
| | Energie | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,91 | 0,69 | 0,55 | 0,08 | 0,05 | 0,04 |
| | *Zwischensumme* | **4,4** | **3,3** | **1,8** | **57,7** | **48,1** | **28,1** | **5,8** | **4,5** | **2,4** |
| Betrieb | Verkehr | 1,7 | 1,3 | 0,8 | 22,1 | 19,2 | 11,9 | 2,2 | 1,8 | 1,0 |
| | IKT | 5,4 | 7,7 | 6,6 | 69,2 | 110,0 | 98,1 | 7,1 | 10,4 | 8,5 |
| | Wasser/Abwasser | 3,1 | 1,9 | 0,9 | 39,8 | 27,1 | 13,7 | 4,1 | 2,6 | 1,2 |
| | Energie | 22,4 | 15,2 | 7,4 | 262,9 | 197,4 | 103,4 | 30,0 | 21,1 | 10,3 |
| | Zwischensumme | **33** | **26** | **16** | **394** | **354** | **227** | **43** | **36** | **21** |
| Summe | | **233** | **245** | **244** | **843** | **848** | **717** | **68** | **63** | **47** |
| *Nutzung*[1)] | *Kraftwerke (fossil)* | *243* | *166* | *79* | *3.112* | *2.373* | *1.165* | *341* | *244* | *112* |

[1)] ***Hinweis:*** Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauaufwendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Tabelle 7: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Sektor | Versiegelte Fläche in 1.000 ha | | |
|---|---|---|---|
| | 2012 | 2030 | 2050 |
| Verkehr | 479 | 504 | 512 |
| IKT | 0,1 | 0,3 | 0,5 |
| Wasser/Abwasser | 14 | 14 | 13 |
| Energie | 10 | 9 | 10 |
| ***Summe*** | **502** | **528** | **536** |
| | **Abweichung gegenüber dem Referenzszenario in 1.000 ha** | | |
| Verkehr | 0 | 0 | 0 |
| IKT | 0,0 | 0,0 | 0,06 |
| Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 |
| Energie | 0 | 1 | 2 |
| ***Insgesamt*** | **0** | **1** | **2** |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Tabelle 8: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau und Unterhalt | Verkehr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | IKT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Energie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |
| | *Zwischensumme* | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** |
| Bau-aufwendungen | Verkehr | 0 | -0,1 | -0,5 | 0 | -0,4 | -3,6 | 0 | 0,0 | -0,4 |
| | IKT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0,0 | -0,02 | 0 | -0,01 | -0,12 | 0 | 0,00 | -0,01 |
| | Energie | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 | -0,04 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| | *Zwischensumme* | **0** | **-0,1** | **-0,5** | **0** | **-0,4** | **-3,8** | **0** | **0,0** | **-0,4** |
| Betrieb | Verkehr | 0 | 0,0 | -0,2 | 0 | -0,2 | -1,6 | 0 | 0,0 | -0,2 |
| | IKT | 0 | 0,7 | -0,6 | 0 | 11,2 | 2,0 | 0 | 1,0 | 0,0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0,0 | -0,3 | 0 | -0,2 | -2,1 | 0 | 0,0 | -0,2 |
| | Energie | 0 | -0,4 | -2,7 | 0 | -3,6 | -23,8 | 0 | -0,4 | -2,3 |
| | Zwischensumme | **0** | **0** | **-4** | **0** | **7** | **-25** | **0** | **1** | **-3** |
| Summe | | **0** | **0** | **-4** | **0** | **7** | **-29** | **0** | **1** | **-3** |
| *Nutzung*[1)] | *Kraftwerke (fossil)* | *0* | *-4* | *-28* | *0* | *-37* | *-249* | *0* | *-4* | *-24* |

[1)] ***Hinweis:*** Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

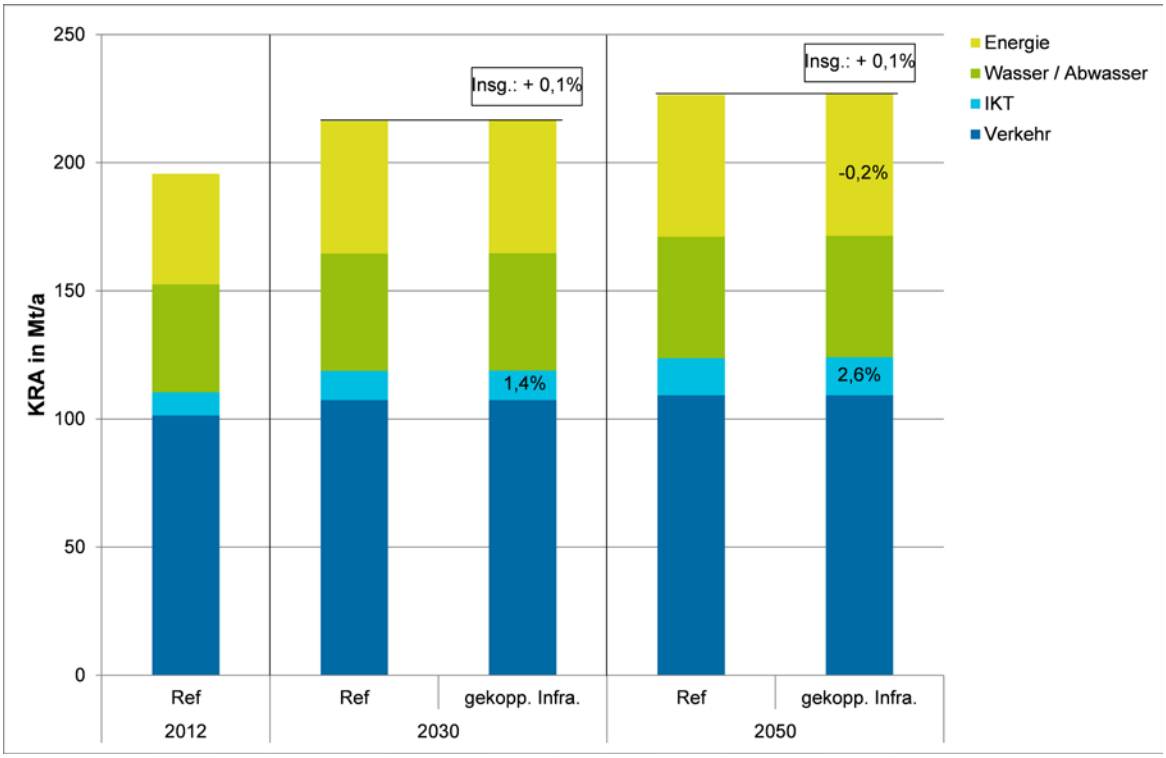
Quelle: Difu/Öko-Institut.

Zum besseren Erfassen der Veränderungen werden im Weiteren nicht nur die absoluten Beträge in den einzelnen Infrastrukturbereichen ausgewiesen, sondern zusätzlich die Differenz gegenüber dem Referenzszenario dargestellt.

Grundsätzlich setzt das Fallbeispiel an der Kopplung Energie-Abwasser an. Die technischen Veränderungen im Kontext der Abwasserinfrastruktur zur Wärmerückgewinnung und Optimierung der Klärgasausbeute und Verwendung im BHKW sind als energietechnische Anlagen/Komponenten bilanziell jedoch nicht dem Abwasser, sondern dem Energiesektor zugeordnet. Der Infrastrukturbestand im Rahmen der Systemgrenze „Abwasser“ verändert sich nicht gegenüber dem Referenzszenario. Wohl aber variiert der Bestand an Energieerzeugungsinfrastruktur sowie der PtX-Erzeugungsanlagen gegenüber dem Referenzszenario. Dies kommt in der folgenden Grafik zum Ausdruck. Ebenso wird der notwendige Ausbau an IKT-Infrastruktur kenntlich, um die Kopplungen und z. B. das Lastmanagement „steuern“ zu können. Die Sektoren Verkehr, Trinkwasser und Abwasserentsorgung unterscheiden sich in dieser Fallstudie mit ihrem Infrastrukturbestand nicht vom Referenzszenario. Aufgrund der veränderten Zusammensetzung des Kraftwerksparks können dennoch Abweichungen der betrachteten Wirkungskategorien in den Bereichen Bauaufwendungen und Betrieb gegenüber dem Referenzszenario auftreten. Wie sich eine möglichst ressourcenleichte Kombination von grauer und grün-blauer Infrastruktur im dezentralen Regenwassermanagement auf die Ergebnisse auswirken würde wird in Teil C Kapitel 3.3.1 in einer Szenarette dargestellt.

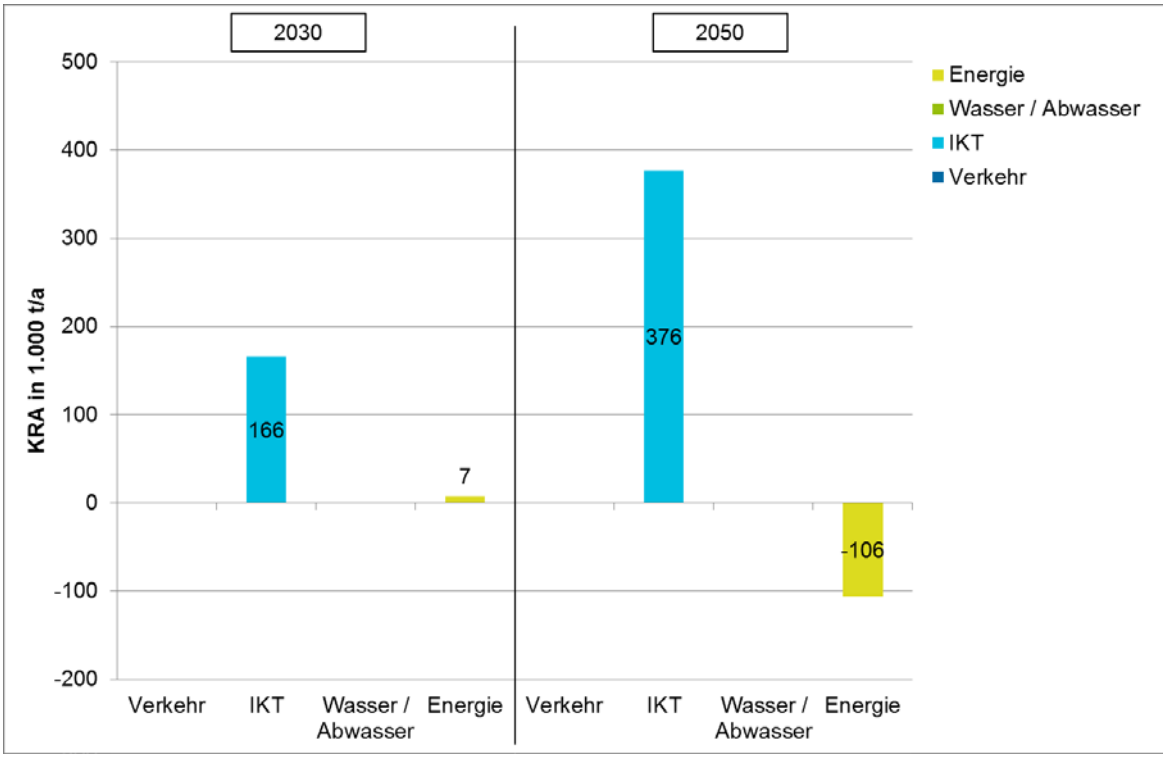
Abbildung 45 zeigt den kumulierten Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050.

Abbildung 45: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 46: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen"; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050



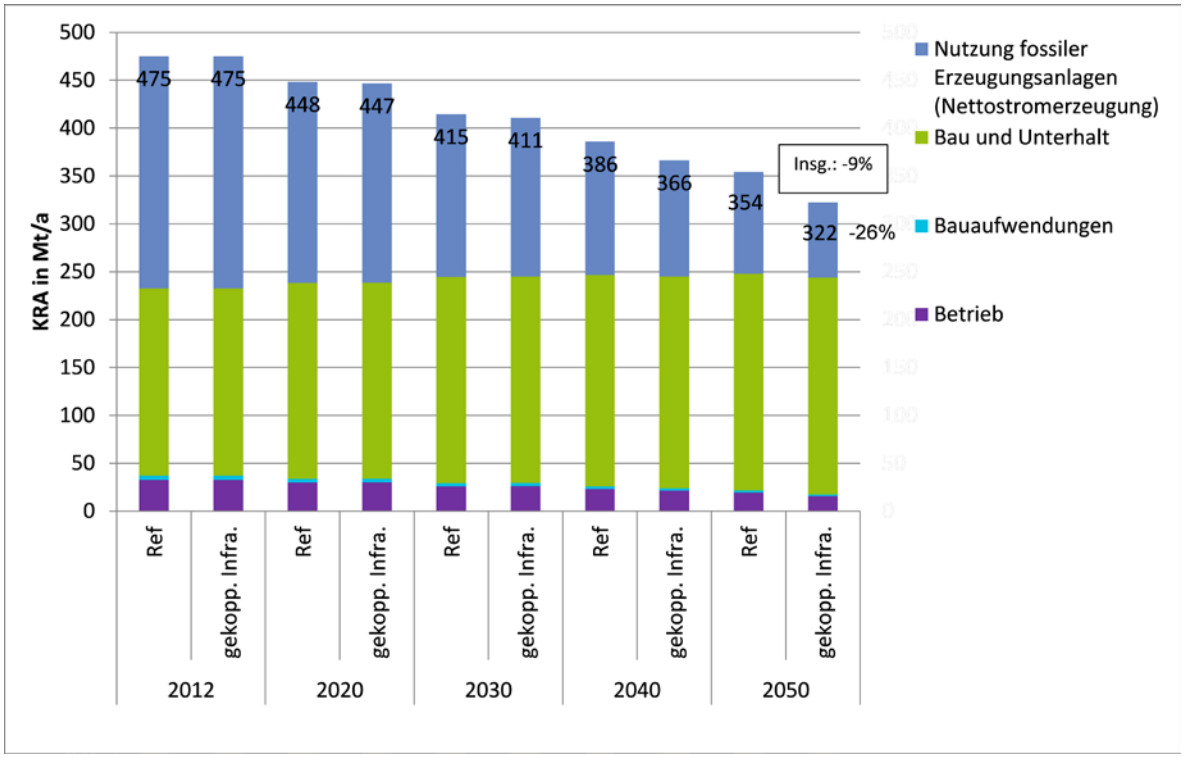

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Der **KRA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur erhöht sich in dieser Fallstudie insgesamt leicht, da er sich im Energiesektor zwar um 0,2 % verringert, im IKT-Sektor jedoch um 2,6 % steigt. Dabei stehen 106.000 t/a eingesparten KRA im Energiesektor 376.000 t/a zusätzlich Bedarf im IKT-Sektor für das Jahr 2050 gegenüber (vgl. Abbildung 46 und Abbildung 48).

Werden nicht allein Bau und Unterhalt, sondern auch die Bauaufwendungen und der Betrieb der Infrastruktur in die Betrachtung einbezogen, ergibt sich ein anderes Bild (vgl. Abbildung 47). Während durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 in dieser Fallstudie ein zusätzlicher Rohstoffaufwand (+0,1 %) verursacht wird, liegt der KRA durch die Bauaufwendungen um 0,5 Mt/a (-21 %) und des Betriebes 3,7 Mt/a (-19 %) unter dem Referenzszenario. Insgesamt verringert sich der KRA in der Fallstudie um 3,9 Mt/a (-2 %).

Mit dem im Vergleich zum Referenzszenario niedrigeren Bestand an Kohlekraftwerken liegt auch die Kohleverstromung und damit der Bedarf an Kohle unter dem Referenzszenario. Im Betrieb (Abbildung 47) ist dies über den Eigenverbrauch der Kraftwerke teilweise enthalten. Nicht enthalten ist der mit der Nettostromerzeugung verbundene Bedarf an Kohle, welcher sich außerhalb der definierten Systemgrenzen befindet. In Abbildung 47 ist der mit der Nettostromerzeugung fossiler Erzeugungsanlagen verbundene KRA als Nutzung (fossiler Erzeugungsanlagen) dargestellt. Dieser liegt im Jahr 2050 in der Fallstudie um rund 28 Mt/a (-26 %) unter dem Referenzszenario. Unter Einbezug der Nutzung liegt der KRA in der Fallstudie rund 9 % unter dem Referenzszenario. Die umgesetzten Maßnahmen sind in Hinblick auf den KRA zielführend im Sinne der Ressourcenleichtigkeit, als das sie eine ressourcenleichte Nutzung erst ermöglichen.

Abbildung 47: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario

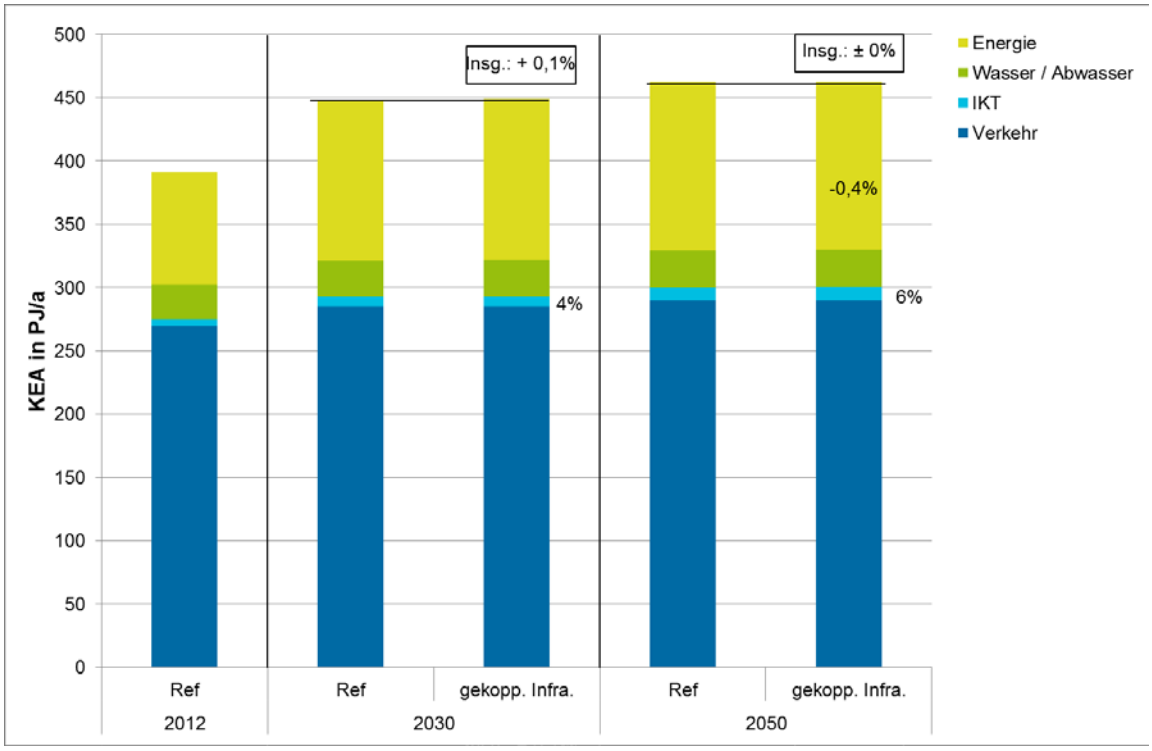



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Beim **KEA** durch Bau und Unterhalt steht einer Steigerung bei der IKT von 6 % ein Rückgang im Energiesektor von 0,4 % gegenüber (vgl. Abb. Abbildung 48). Dies sind in absoluten Zahlen für das Jahr 2050 ausgedrückt Einsparungen von 534 TJ/a im Energiesektor und Steigerungen von 607 TJ/a bei der IKT gegenüber dem Referenzszenario (vgl. Abbildung 49).

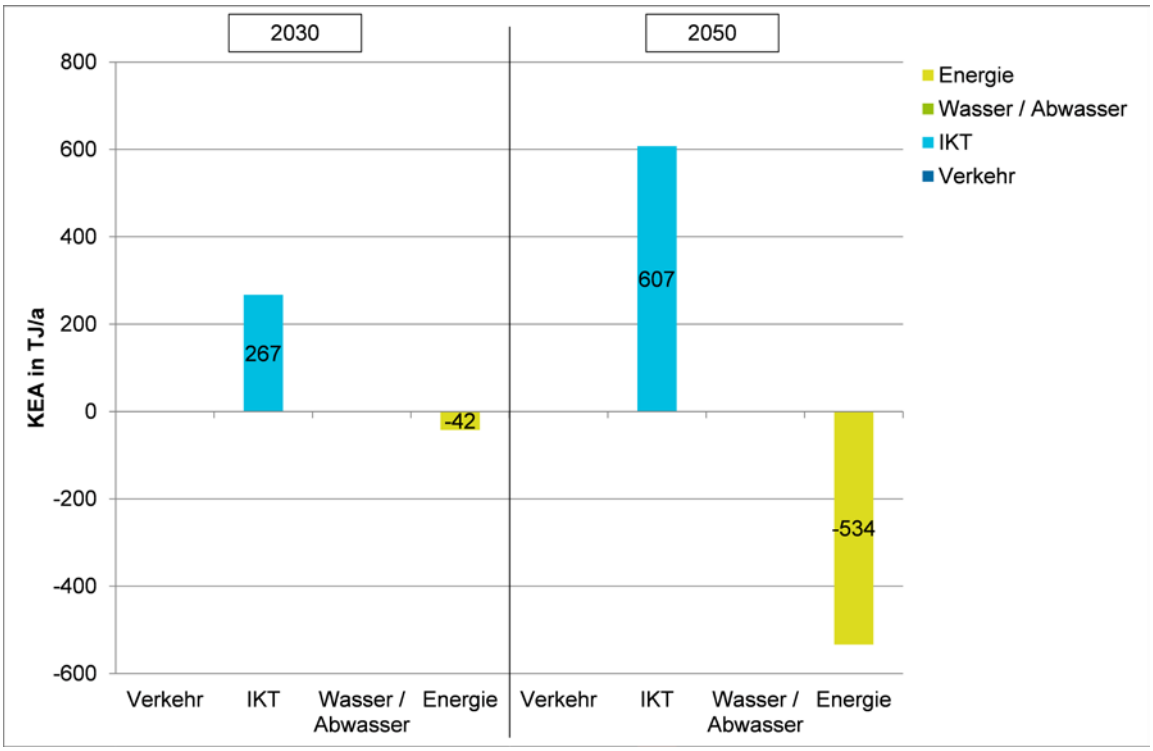
Ein Blick auf die Differenzen zeigt für den KEA im Bereich der Energieinfrastrukturen durch das Schöpfen der Wärme- und Energiepotenziale im Abwasser in 2030 eine leichte Reduktion um 42 TJ/a. Bis zum Jahr 2050 steigt die Reduktion auf 534 PJ/a. Demgegenüber erhöht sich der KEA der IKT-Infrastruktur um 267 TJ/a (2030) bzw. 607 TJ/a (2050).

Abbildung 48: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 49: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050

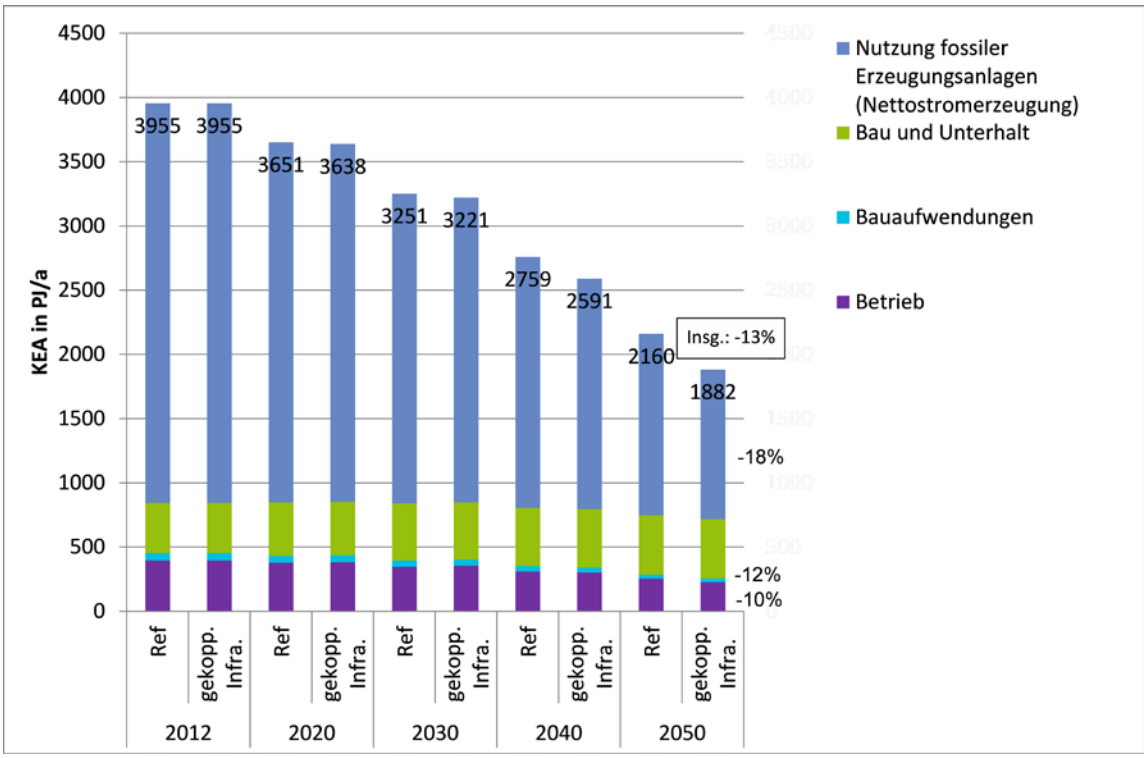



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Werden Bauaufwendungen (-4 PJ/a bzw. -12 %) und Betrieb der Infrastruktur (-25 PJ/a bzw. -10 %) in die Betrachtungen einbezogen verringert sich der KEA in dieser Fallstudie im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzszenario um 29 PJ/a (-4 %).

Wird zusätzlich dazu die Nutzung der fossilen Erzeugungsanlagen betrachtet liegt der Minderverbrauch insgesamt bei 278 PJ/a (-13 %) (vgl. Abbildung 50).

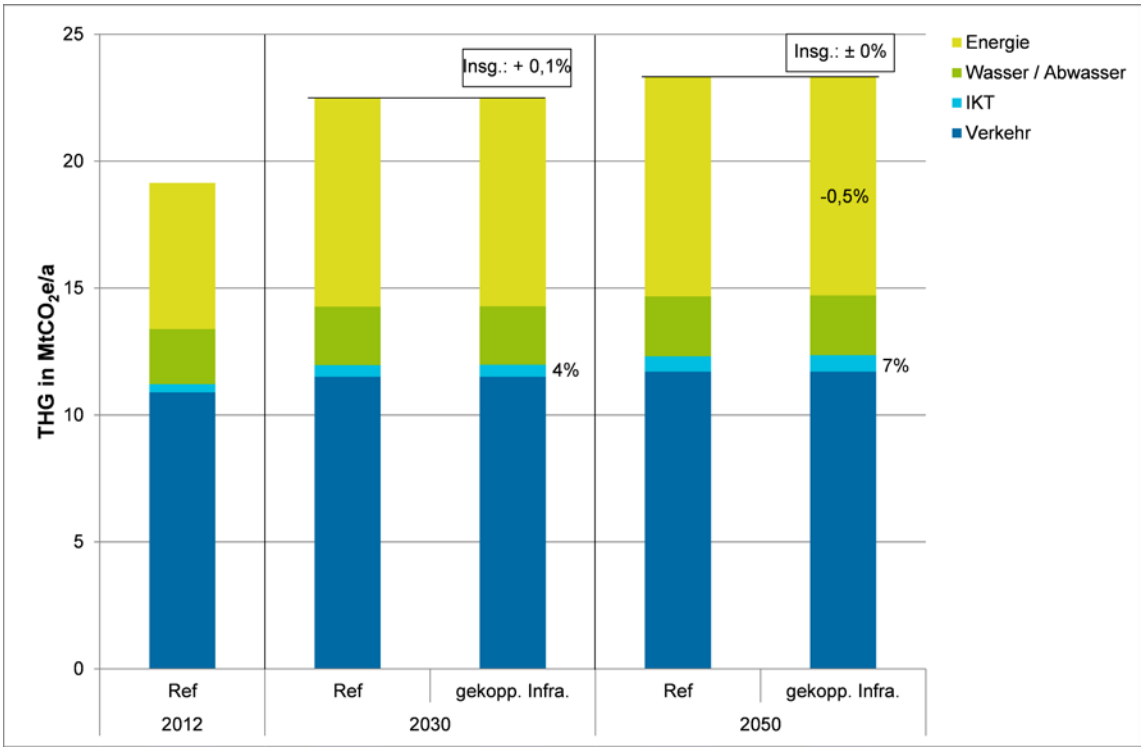
Abbildung 50: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Bei den **THG-Emissionen** ergibt sich ein dem KEA vergleichbares Bild. Bei den THG fallen die Emissionen für die Energieinfrastrukturen um 0,5 %, die THG-Emissionen bei der IKT wiederum steigen um 7 % im Jahr 2050 verglichen mit dem Referenzszenario (vgl. Abb. 7). Dabei stehen 41.000 t $CO_2$ äq/a an Einsparungen (Energiesektor) 40.000 t $CO_2$ äq/a zusätzlichen Ausstoß (IKT) entgegen (vgl. Abbildung 51 und Abbildung 52). Insgesamt ergibt sich im Jahr 2050 in der Fallstudie deshalb keine relevante Veränderung hinsichtlich der THG-Emissionen gegenüber dem Referenzszenario in Bezug auf den Bau und Unterhalt der Infrastruktur.

Abbildung 51: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050



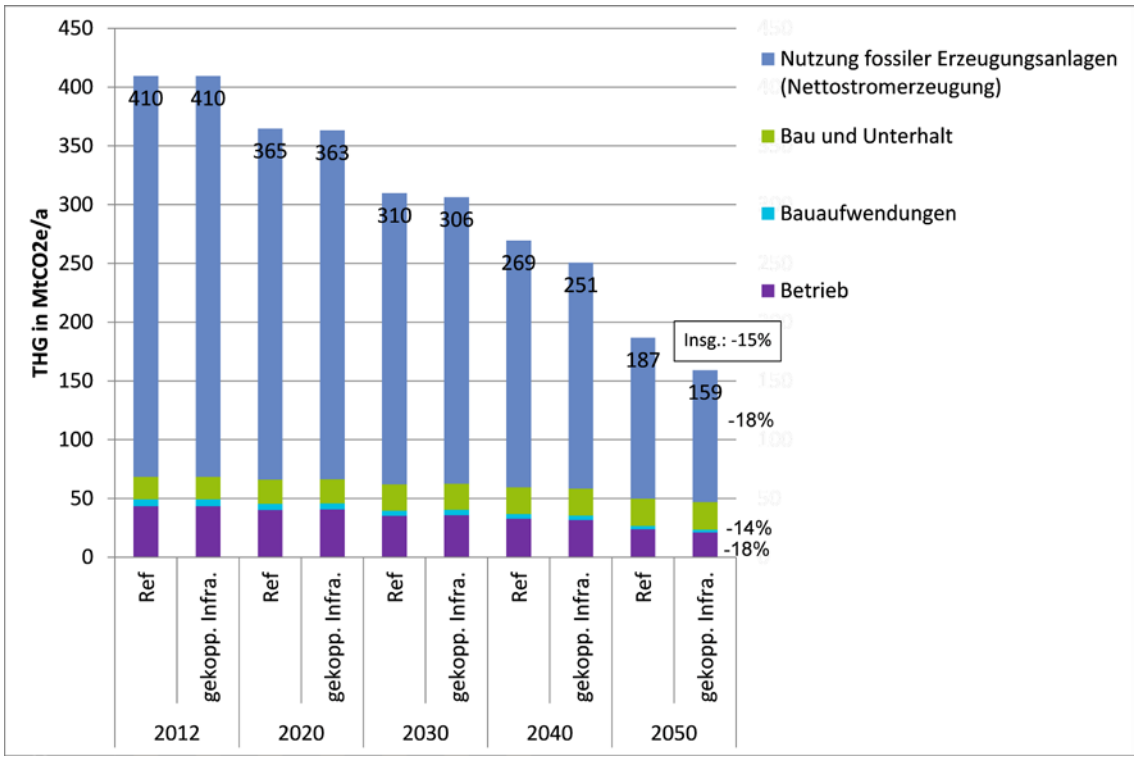

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 52: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Bei den Bauaufwendungen und dem Betrieb kommt es dagegen durch den geringeren Anteil an Kohlestrom zu deutlich niedrigeren Emissionen als im Referenzszenario. Bei den Bauaufwendungen kommt der im Vergleich zum Referenzszenario höhere Anteil an Strom aus erneuerbaren Energien im Strommix zu tragen, weshalb die Treibhausgasemissionen um 0,4 Mt/a (-14 %) unter dem Referenzszenario liegen. Beim Betrieb liegen die Emissionen im Jahr 2050 sowohl aufgrund des grüneren Strommixes als auch durch den geringeren Eigenverbrauch fossiler Erzeugungsanlagen um 2,7 Mt/a (-11/ %) unter dem Referenzszenario. Besonders stark weicht die Fallstudie hinsichtlich der mit der Nutzung verbundenen Emissionen vom Referenzszenario ab (rund 24 Mt $CO_2$ äq/a bzw. -18 %). Unter Einbezug der Nutzung beträgt die durch die umgesetzten Maßnahmen erzielbare Minderung bei 28 Mt/a (-15 %).

Abbildung 53: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario

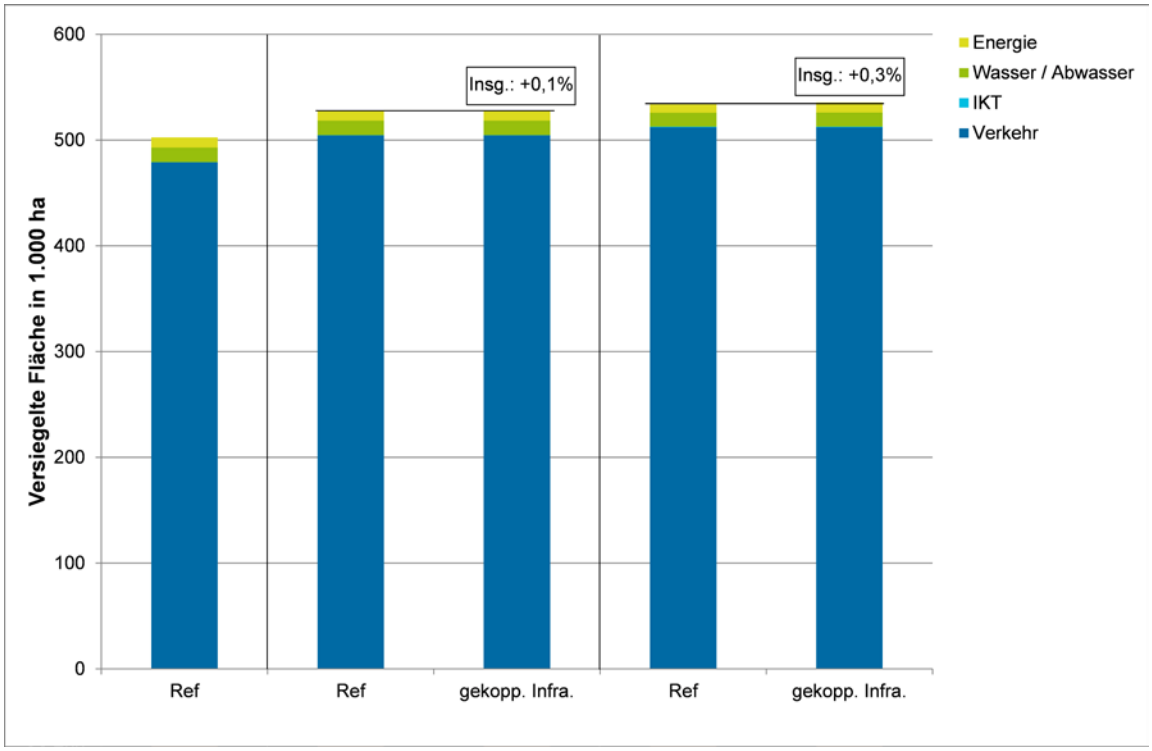



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die Fallstudie erzielt auch mit Blick auf die **Flächeninanspruchnahme** eine leichte Zunahme gegenüber dem Referenzszenario. Bei einem Blick auf die absoluten Zahlen wird deutlich, dass der Ausbau der IKT-Infrastruktur (Rechenzentren und Netze) nur einen geringen Effekt besitzt. Der Großteil der zusätzlichen Flächeninanspruchnahme resultiert aus den Veränderungen der Energie-Infrastruktur. Dort führt der Rückgang an fossilen Erzeugungsanlagen zu eine geringeren Flächeninanspruchnahme. Zusätzliche Blockheizkraftwerke sowie PtX-Erzeugungsanlagen führen jedoch zu einer in der Summe größeren Flächeninanspruchnahme. Insgesamt liegt die Flächeninanspruchnahme (versiegelte Flächen) in dieser Fallstudie im Jahr 2050 rund 1.700 ha über dem Referenzszenario (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55).

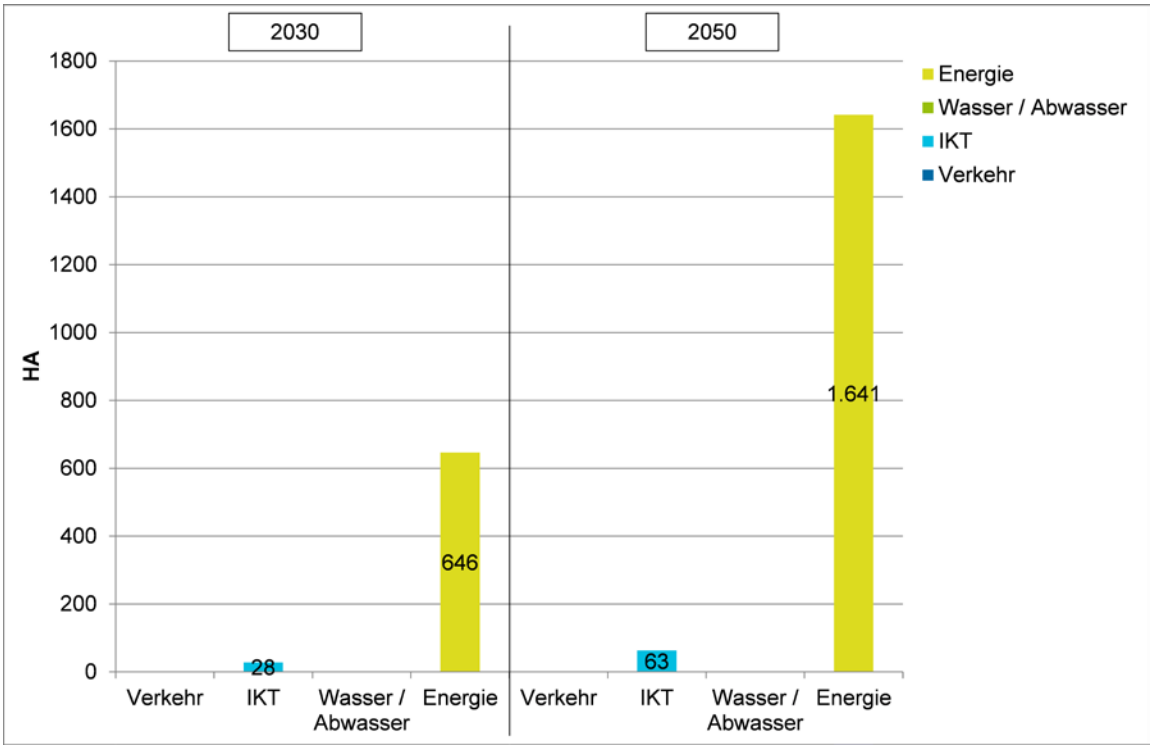
In der Gesamtbilanz schlägt sich diese zusätzliche Inanspruchnahme kaum nieder, da der Verkehrssektor mit seiner Flächeninanspruchnahme alle anderen Sektoren dominiert.

Abbildung 54: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 55: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050

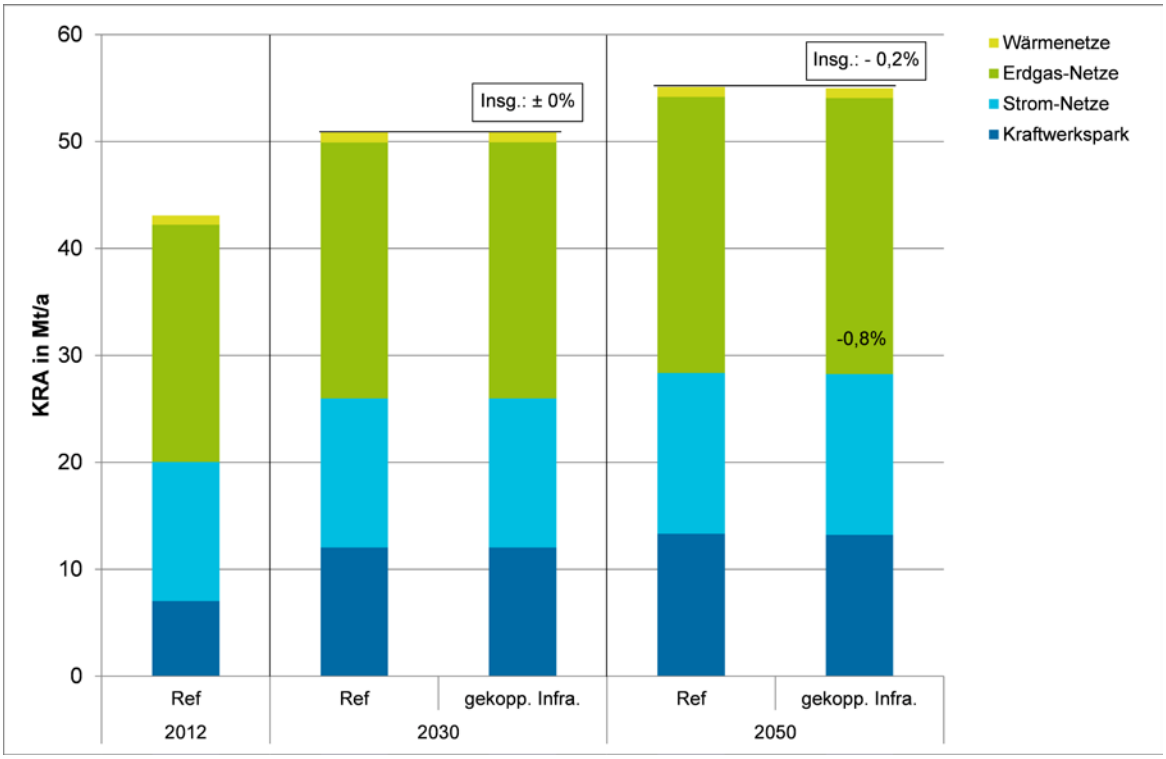



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Im Folgenden wird ein vertiefender Blick auf die Entwicklung der Energieversorgungsinfrastruktur im Rahmen dieser Fallstudie geworfen. Ein tieferer Blick auf die Veränderungen im Kraftwerkspark zeigt, dass sich die in den Abwasserinfrastrukturen gewonnenen Wärme- und Strompotenziale positiv in einem Rückbau fossiler Kraftwerke ausdrücken lassen. Mit den angenommenen Maßnahmen lassen sich im Jahr 2050 verglichen mit dem Referenzszenario insgesamt 0,2 % des KRA der Energieversorgungsinfrastrukturen einsparen (in Übereinstimmung mit klimapolitischen Zielstellungen wurden insb. Braunkohle-Kraftwerke im Modell reduziert) (vgl. Abbildung 56).

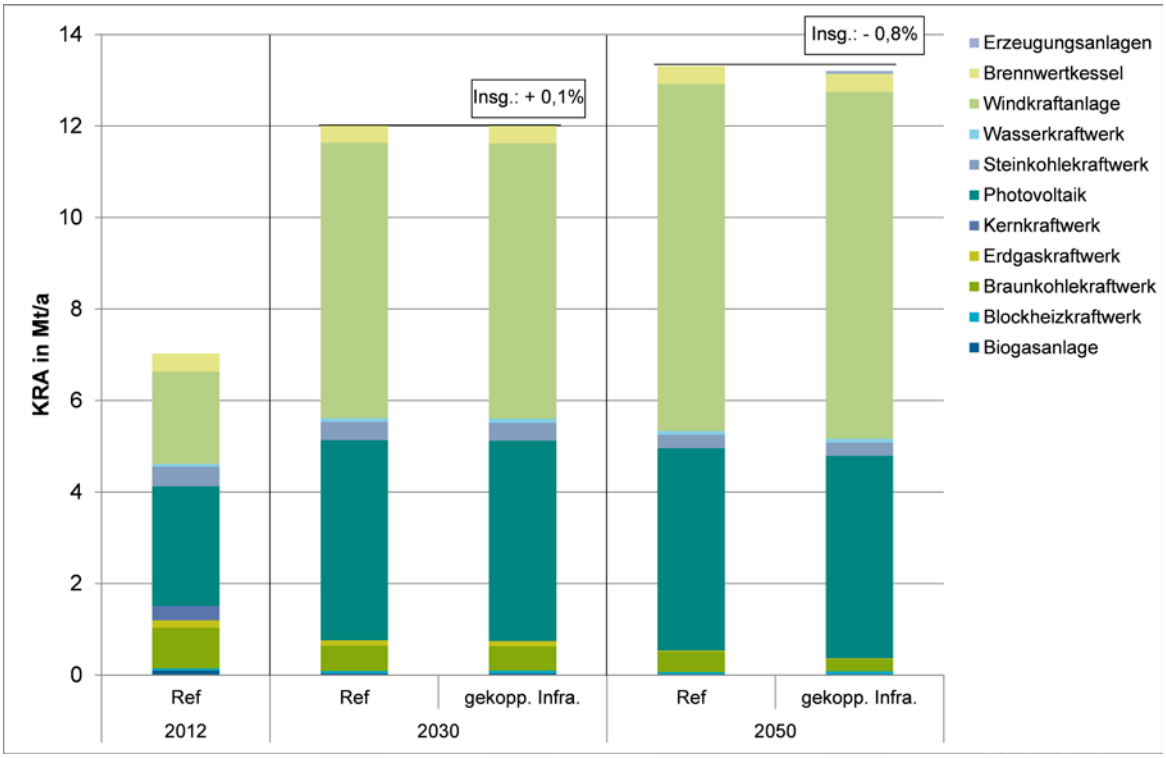
Diese Einsparungen bei den Energieversorgungsinfrastrukturen resultieren aus einer Reduktion im Kraftwerkspark, der sich hier mit 0,8 % weniger KRA im Jahr 2050 niederschlägt (vgl. Abbildung 57). Fokussiert man nun die konventionellen Erzeugungsanlagen zeigt sich, dass sich der fossile Kraftwerkspark (Steinkohle, Braunkohle, Erdgas und Blockheizkraftwerk) durch das Schöpfen der (theoretisch angenommenen) Energiepotenziale im Abwassersektor für den Parameter KRA um 21 % reduzieren lässt. Bezieht man diese Reduktion auf die Braunkohlekraftwerke ergibt sich für den Braunkohlekraftwerksbestand in der Fallstudie im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario eine Reduktion im KRA um 41 % (vgl. Abbildung 58).

Abbildung 56: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ für die Energieversorgungsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050



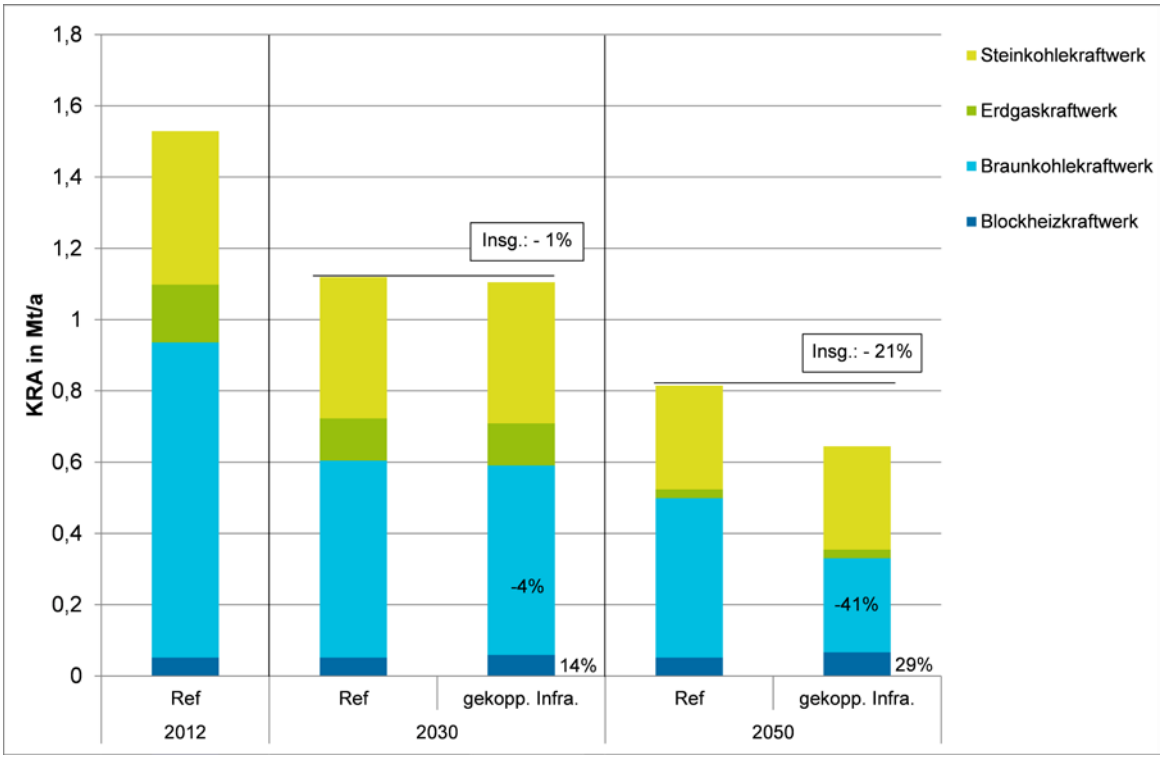

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 57: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ für den Kraftwerkspark im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 58: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ für den fossilen Kraftwerkspark im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050



Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.2.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

In dieser Fallstudie wurden folgende Ansätze für die Berechnung der orientierenden Stoffstromanalyse umgesetzt: die konsequente Nutzung bzw. Ausbau von Biomasse-Vergärung auf Kläranlagen (Klärschlamm und teilweise Ko-Substrate) und die Rückgewinnung der Wärme aus Abwasserströmen. Weiterhin werden PtX-Anlagen konsequent ausgebaut. Somit ergeben sich Effekte insbesondere in der Energieinfrastruktur, die sich in allen Parametern niederschlagen. Zudem steigt der Aufwand im IKT-Sektor durch den Ausbau der Rechenzentren für die notwendige „smarte“ Vernetzung und Kopplung der Infrastrukturen.

Auffällig ist, dass sich die Parameter KRA, KEA und Flächeninanspruchnahme durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in dieser Fallstudie nur geringfügig gegenüber dem Referenzszenario verändern. Insgesamt sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse für diese Fallstudie in der gewählten Konstellation ernüchternd, wenn man als Ziel eine spürbare Reduktion der Ressourceninanspruchnahme und damit ein Mehr an Ressourcenleichtigkeit durch den Bau und Unterhalt erreichen möchte. Es ist offensichtlich, dass entweder die bisher modellierten Maßnahmen im Rahmen der Fallstudie nicht ausreichen, um nennenswerte Effekte aufzeigen zu können. Oder die Fallstudie hat in ihrer Gesamtkonzeption ein nur sehr beschränktes Potenzial für Ressourcenleichtigkeit, wenngleich die Maßnahmen aus Energieeffizienz-Gründen wohl unverzichtbar sind.

Deutliche Ressourcenleichtigkeitspotenziale bestehen jedoch bei den Bauaufwendungen, also dem baustellenseitigen Energieverbrauch, und dem Betrieb der Infrastruktur. Letzterer umfasst u. A. auch den Eigenverbrauch der Braun- und Steinkohlekraftwerke. Zudem verbessern sich die spezifischen Emissionsfaktoren für in den anderen Infrastruktursektoren verwendeten Strom, wodurch es auch in den Sektoren Verkehr, IKT und Wasserver- und Entsorgung zu geringeren Emissionen im Betrieb kommt. Durch den Rückgang an fossilen Erzeugungsanlagen nehmen KRA, KEA und THG im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario ab. Insgesamt führt die Fallstudie im Jahr 2050 zu folgenden Minderungen:

- KRA: -2 %;
- KEA: -4 %,
- THG: -6 %.

Der Flächenverbrauch liegt in dieser Fallstudie insbesondere aufgrund des Ausbaus an PtX-Erzeugungsanlagen (rund 2.000 ha) insgesamt um 0,3 % höher als im Referenzszenario.

Die größte Minderung in der Fallstudie resultiert aus der außerhalb der Systemgrenzen liegenden Nutzung (Nettostromverbrauch). Schließt man diese in die Betrachtung ein, ergibt sich folgende Abnahme:

- KRA: -9 %;
- KEA: -13 %,
- THG: -15 %.

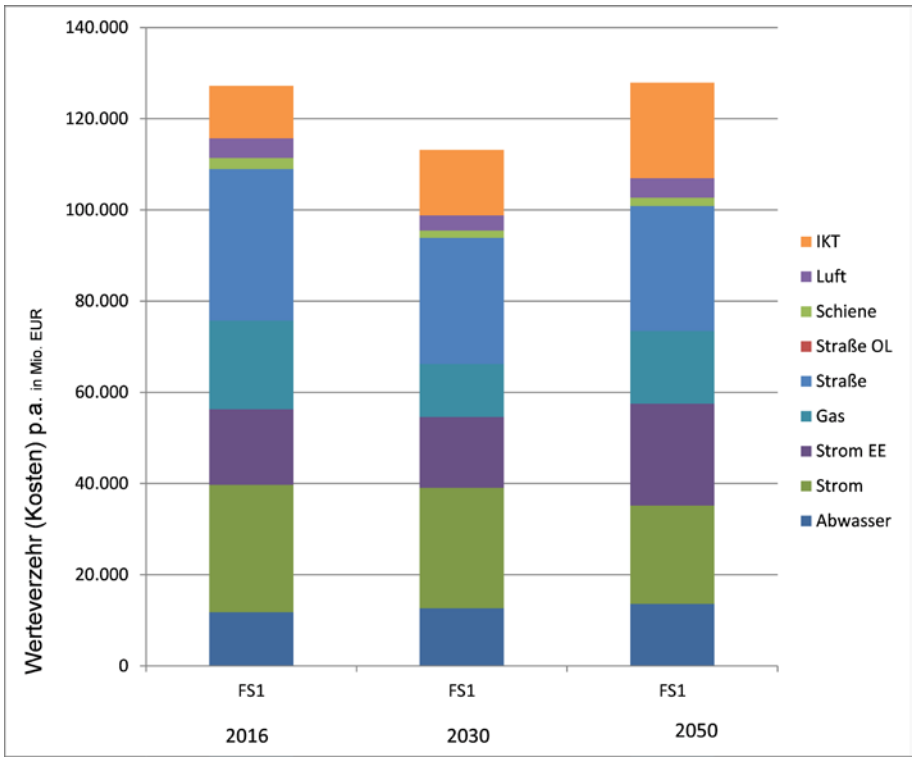
Die Fallstudie beinhaltet zwar ein begrenztes Potenzial für Ressourcenleichtigkeit, ermöglicht aber eine ressourcenleichtere Strombereitstellung. Das unter Einbezug der Nutzung abgeschätzte Potenzial ist durchaus relevant. Weiterhin wären zusätzliche Maßnahmen im Zuge der gekoppelten Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen denkbar, wie z. B. die in einer Szenarette (Teil C Abschnitt 3.3.1) betrachtete ressourcenleichte Kombination von grauer und grün-blauer Infrastruktur im dezentralen Regenwassermanagement oder die Umstellung der Abwasserbehandlung im ländlichen Raum auf de- bzw. semizentrale Lösungen (kleine und Kleinstkläranlagen), die weitere Potenziale erschließen könnten.

Ein weiteres Potenzial, das in der Fallstudie angelegt ist, jedoch nicht einer Stoffstromanalyse unterzogen werden konnte, besteht im möglichen Verzicht auf den Aufbau von umfangreichen Stromspeicherkapazitäten auf Basis von Batterien aufgrund der Nutzung der bestehenden Gas- und Wärmeinfrastrukturen.

### 2.2.6 Abschätzung der Kostenentwicklung in der Fallstudie

Aufgrund der in der Fallstudie zugrunde gelegten Annahmen zu Anpassungen der Infrastruktur ergeben sich gegenüber dem Referenzszenario lediglich geringe Veränderungen bei den Kapitalkosten. Die grundsätzliche Einschätzung einer stabilen Kostenentwicklung bleibt bestehen.

Abbildung 59: Kapitalkosten in der Fallstudie 1 „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.2.7 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie

Ergänzend zu der orientierenden Stoffstromanalyse und der Abschätzung der Kostenentwicklung wurde die Fallstudie „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ einer Einschätzung ihre Potenziale und Effekte auf die qualitativen Kriterien gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe von Bürgerinnen und Bürgern, Flexibilität, Reversibilität und Resilienz unterzogen (vgl. Teil A).

Für die Einschätzung der **gesellschaftlichen Akzeptanz** der Fallstudie „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ und der hierin angelegten Maßnahmen können u.a. folgende Argumente ins Feld geführt werden:

Zunächst bedingt die Fallstudie keine oder kaum Veränderungen für die Bürgerinnen und Bürger (Kunden) in ihrer alltagspraktischen Nutzung der Infrastrukturen (ihrer Routinen) und der Qualität der Infrastrukturdienstleistungen. Es sind keine grundlegenden sozialen Innovationen erforderlich. Des Weiteren wird auch nicht die Frage der Suffizienz („Genügsamkeit“ oder „Verzicht“) für die Inanspruchnahme der Infrastrukturdienstleistungen gestellt. So gesehen dürfte die gesellschaftliche Ak-

zeptanz dieser Fallstudien als hoch eingeschätzt werden, zumal sich die Kostenentwicklung nach den hier vorgenommenen Abschätzungen nicht vom Referenzszenario unterscheiden sollte.

Einschränkend kann ins Feld geführt werden, dass einzelne Maßnahmen der Fallstudie Anpassungen bzw. Umbaubedarfe nicht nur der öffentlichen, sondern auch der privaten Infrastruktur (Hausinstallationen) implizieren. Zum Beispiel löst die Umrüstung der Wärmenetze auf Niedertemperatur einen Umbaubedarf privater Heizungsanlagen aus. Hier ist eine Betroffenheit der Bürgerinnen und Bürger (entweder als Immobilienbesitzer oder als Mieter) gegeben, die Kosten verursachen und damit die Akzeptanz negativ beeinflussen kann. Ein zweiter kritischer Punkt wurde im Thema „Daten“ und „Datensicherheit“ bzw. Datenschutz identifiziert. Die Maßnahme des vollständigen Einsatzes von smart meter zur Erschießung der Potenziale für smart grids und Energieeffizienz könnte von Teilen der Gesellschaft als kritisch gesehen werden.

Die Potenziale der politischen **Teilhabe** der Bürgerinnen und Bürger im Rahmen dieser Fallstudie werden insgesamt als mit dem heutigen System vergleichbar eingeschätzt. Die Fallstudie operiert stark im lokalen und kommunalen Kontext. Die Bürgerbeteiligung in kommunalen Planungsprozessen ist klar geregelt, auch wenn sie in den Kommunen z. T. sehr unterschiedlich praktiziert wird. Politische Teilhabe ist in Kommunen grundsätzlich im repräsentativ demokratischen Modus gegeben.

Potenziale für eine größere Rolle der Bürgerinnen und Bürger in direkteren Formen der Bürgerbeteiligung und auch einem direkten Engagement können sich einstellen, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energie auf lokaler Ebene mit einem weiteren Anwachsen von unterschiedlichen Bürgerenergie-Modellen verbunden ist. Hier steigt dann neben einer politischen ggf. auch eine ökonomische Teilhabe an der Governance des Infrastruktursystems in der Rolle von „Prosumern“ und Produzenten.

Der Ausbau der lokalen Verteilnetze zu smart grids erfordert bzw. befördert den offenen Zugang zu Daten („open data“), damit die einzelne Akteure sich „smart“ aufeinander abstimmen und verhalten können. Dies soll zu einer Optimierung des Gesamtsystems führen und kann auch für zivilgesellschaftliche Akteure die Teilhabe am System ermöglichen bzw. Möglichkeiten der Beteiligung erweitern. Und schließlich ist die Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger durchaus im Interesse der wirtschaftlichen und politischen Akteure, da Teilhabe und Partizipation (sei es in Planungsverfahren oder in höherem Maße noch als Prosumer und Produzent) die gesellschaftliche Akzeptanz der Fallstudie und einzelner Maßnahmen positiv beeinflussen kann.

Zur Beurteilung der **Resilienz** der Infrastrukturen in der Fallstudie lassen sich u.a. folgende Argumente benennen. Die Grafik zur Darstellung der vielfältigen Kopplungen zwischen den Sektoren, Teilsystemen und Komponenten visualisiert deren hohe Verflechtung (vgl. Teil C Kapitel 2.2.1). Hieraus können sich im Falle eines Störfalls bzw. eines Extremereignisses[70], das zu einem Ausfall einzelner Komponenten im System führt, Wirkungsketten mit Folgen für weitere Systeme und Infrastrukturdienstleistungen ergeben. Der Ausfall einer Komponenten bzw. Teilsystems kann dazu führen, dass dessen Input (z. B. Energie, Wasser) für einen anderen Sektor entfällt und dieser Wegfall auch in diesem System zu Ausfällen bzw. Funktionseinschränkungen kommt. Dem gegenüber steht die Einschätzung, dass derart simple Wirkungsketten (auch als „Kaskadeneffekte“ (BMVI 2009) bezeichnet) in gekoppelten Systemen sich (zumindest teilweise und zeitlich bestimmt) vermeiden bzw. beherrschen lassen. Zwar sind die Teilsysteme miteinander gekoppelt, aber sie können dennoch (für bestimmte Zeitfenster) autonom betreiben werden, wenn entsprechende Puffereigenschaften aufgebaut sind oder Redundanzen vorliegen (beides ist insbesondere eine ökonomische und politisch zu beantwortende Frage, wieviel diese „Sicherheitsvorkehrungen“ kosten dürfen).

70 Folgende Extremereignisse wurden für ein Einschätzung der Resilienz angenommen: Terroranschlag, Hackerangriff, Extremhitze, Orkan, Überschwemmung/Starkregen, Ausfall durch Über-/Unterlast, flächendeckender Stromausfall.

In der Fallstudie wird mit einer Vielzahl an teils substituierbaren Quellen (Abwasserwärme, Klärschlamm, EE-Anlagen usw.) und Senken (Speicher, PtX-Anlagen, Wasserwirtschaft) für Wärme und Strom operiert. Dies kann die Resilienz im Gesamtsystem erhöhen, zumal die Energieträger im System austauschbar sind.

Die Resilienz der Infrastrukturen in der Fallstudie bzw. die Einschätzung ihrer Vulnerabilität variiert je nach angenommenen Stör- bzw. Extremereignis. So dürfte ein Orkan weniger gefährlich für das System sein, da die in der Fallstudie angelegten Infrastrukturen im Siedlungskontext Großteils unterirdisch verlegt sind. Aufgrund der Kopplung der Systeme über IKT basierte Steuerungstechnik (z. B. „smart grids“) dürfte die Anfälligkeit dieser Fallstudie gegenüber eines Hackerangriffs oder Sabotage demgegenüber als höher eingeschätzt werden.

Für die Infrastrukturen der Abwasserentsorgung und Stadtentwässerung wird von einem Primat des dezentralen Regenwassermanagements in Siedlungen ausgegangen. Es ist in der Stadtplanung und der Siedlungswasserwirtschaft Stand der Debatte, dass Effekte des Klimawandels wie insb. Starkregenereignisse nicht alleine mit technischen Lösungen in der Abwasserinfrastruktur begegnet werden können, sondern eine intelligente Kopplung von grauen (Kanalisation), grünen (Freiflächen, Dachbegrünung usw.) und blauen (Gewässer) Infrastrukturen erforderlich ist. Damit kann die Resilienz gegenüber dem Klimawandel erhöht werden, zumal wenn Stadt- und Infrastrukturplanung integriert und sensibel für die Wirkungen des Klimawandels erfolgt.

Die genannten Maßnahmen und darin angelegten Kopplungen führen nach Einschätzung des Bearbeiterteams zu einer bei aller notwendigen Differenzierung insgesamt etwas verbesserten Resilienz der Infrastruktursysteme der Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario.

Grundlegende Prinzipien für **Flexibilität** sind „Polyvalenz“ und „multiple Nutzung“ von Infrastrukturen. Grundsätzlich zielt Flexibilität auf eine (langfristige) Anpassungsfähigkeit eines Systems, sodass das System auf unterschiedliche bzw. sich verändernde Rahmenbedingungen reagieren kann. In der Nutzung der gekoppelten Infrastrukturen und ihrer Teilsysteme ist nach Einschätzung des Bearbeiterteams zunächst eine hohe Flexibilität im Betrieb als Anpassungsfähigkeit des Systems gegenüber Veränderungen der kurzfristigen Rahmenbedingungen (Systemumwelt) angelegt. Die Multifunktionalität von Anlagen (BHKW) und Netzen (z. B. Gas- und Wärmenetze als Energiespeicher) kommt auch in den vielfältigen Quellen und Senken, die im System angelegt sind zum Ausdruck (vgl. Resilienz). Eine Reihe von Maßnahmen in der Fallstudie lässt sich unter dem Begriff der „Flexibilitätsoptionen“ bei steigendem Anteil von Erneuerbaren Energien im Energiesystem fassen (Lastmanagement, Umwandlungsoptionen, Speicher).

Mit Blick auf die hier fokussierte langfristige Anpassungsfähigkeit kommen Hemmnisse wie lange Abschreibungszeiträume, Pfadabhängigkeiten oder fehlende Möglichkeiten, die Kapazitäten zu erhöhen, ins Spiel. In diesem Sinne kann die mittel- bis langfristige Flexibilität der Fallstudie auch bzgl. der Rückbaufähigkeit (Reversibilität) durchaus kritisch eingeschätzt werden. Denn durch den Ansatz, bestehende Netze und Anlagen möglichst weiter zu nutzen, bleiben die bekannten zentralen Netze im Siedlungsraum bestehen (z. B. Abwasserkanalisation, Gas- und Wärmenetze). Veränderungen gegenüber dem Status quo bzw. dem Referenzszenario sind in dieser Hinsicht eher gering. Vorhandene Infrastrukturpfade werden damit weiter gepflegt, was als Innovationshemmnis und eingeschränkte Flexibilität gewertet werden kann.

Stellt man die (Investitions-)Kosten und Abschreibungen der Infrastrukturen in den Fokus einer ökonomischen Beurteilung von Flexibilität, ist es durchaus denkbar, dass die in dieser Fallstudie vorgesehene Anpassung der bestehenden Infrastrukturen zur weiteren Nutzung Vorteile bietet, da die Anpassungsinvestitionen geringer ausfallen als bei einem vollständigen Neubau (innovativer Systeme) und damit die Abschreibungen und Kapitalverpflichtungen geringer ausfallen.

Grundsätzlich unterscheidet sich die **Reversibilität** (im Sinne von Rückbaufähigkeit) der Fallstudie nicht vom Referenzszenario.. Der im Rahmen der Fallstudie vorangetriebene Ausstieg aus fossilen Energieträgern bewirkt weniger THG-/$CO_2$- und Luftschadstoff-Emissionen und damit potenziell weniger Umweltschäden. Auch werden verglichen mit Batteriespeichern weniger seltene Erden in Anspruch genommen, mit den entsprechenden geringeren Umwelt- und gesellschaftlichen Folgen in den Förderländern von Lithium, Neodym usw.

## 2.3 Fallstudie „Kopplungen Energie – Verkehr“

### 2.3.1 Das Szenario im Jahr 2050

Für die Erreichung der Klimaschutzziele sind erhebliche Minderungen der globalen Treibhausgasemissionen bis 2050 notwendig. In Deutschland müssen die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden (vgl. Bundesregierung 2010). Dies erfordert einen breiten Strukturwandel in den energienachfragenden Sektoren. Im Verkehrssektor stellt die notwendige Dekarbonisierung eine besondere Herausforderung dar, da hier bislang eine sehr starke Bindung an fossile Energieträger beim Fahrzeugantrieb besteht.

Für den Verkehrssektor sind solch hohe Minderungen unter Berücksichtigung des prognostizierten Verkehrswachstums nur durch einen starken Einsatz von alternativen Antriebskonzepten und Kraftstoffen realisierbar. Eine besondere Bedeutung kommt dabei dem elektrischen Antrieb zu [Stra 2, 6].[71] Dieser ermöglicht es, unter der Voraussetzung einer zunehmenden Dekarbonisierung der Energiewirtschaft, auch im Verkehrssektor die Integration erneuerbarer Energien zu realisieren und sich einer $CO_2$-Neutralität zu nähern (Hacker et al. 2014).

Zur weitgehenden Integration von Strom aus erneuerbaren Quellen sind verschiedene Pfade denkbar. Zum einen steht die direkte Nutzung in Fahrzeugen mit Energiespeichern zur Verfügung. Daneben können durch Einsatz von Strom synthetische Kraftstoffe, Flüssigkraftstoff (PtL) und Gas (PtG), produziert werden, welche in konventionellen Fahrzeugen Verwendung finden. Eine dritte Option stellt die Nutzung von alternativen Antriebskonzepten unter Verwendung von stromerzeugtem Wasserstoff dar.

Aus energetischer Sicht ist die direkte Nutzung elektrischer Energie den anderen Optionen vorzuziehen, sofern keine technischen oder finanziellen Restriktionen bestehen. Der Endenergieverbrauch batterieelektrischer Fahrzeuge liegt aufgrund der höheren Wirkungsgrade der Motoren und der Möglichkeit zur Bremsenergierückgewinnung rund halb so hoch wie bei konventionellen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen und deutlich unter dem von $H_2$-Brennstoffzellenfahrzeugen (Hülsmann et al. 2014).

Aufgrund der hohen Kosten, einem möglichem Zusatzgewicht und der Ressourcenintensität der Batterien ist der Einsatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) insbesondere bei niedrigen bis mittleren Tagesfahrleistungen geeignet. Für Fahrzeuge mit längeren Tagesfahrleistungen bietet sich die Kombination von einem Verbrennungsmotor und einem Stromspeicher, welcher über das Netz geladen wird, in sog. Plug-In-Fahrzeugen (PHEV) an. Für den konventionellen Fahrleistungsanteil dieser Fahrzeuge kann dann auf PtL-Kraftstoffe zurückgegriffen werden.

Für Fahrzeuge die sehr große Distanzen zurücklegen wie beispielsweise der Straßengüterverkehr, der (dieselbetriebene) Schienenverkehr, die Schifffahrt und die Luftfahrt stellt der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge oder Plug-In-Hybride vorerst keine sinnvolle Option dar. In diesen Fällen können PtX-

71 Die folgenden Codierungen verweisen auf die entsprechenden, an den jeweiligen Stellen relevanten strategischen Ansatzpunkte, wie sie in Teil B Kapitel 3 eingeführt sind.

Kraftstoffe zur Integration der erneuerbaren Energien in den Verkehrssektor eingesetzt werden. Für die Schifffahrt wird derzeit, auch aus Gründen der Vermeidung von Luftschadstoffen, der Einsatz von verflüssigtem Methan (LNG) diskutiert (Lloyd's Register 2012). Damit böte sich an dieser Stelle der Einsatz von PtG an [BSch 2].

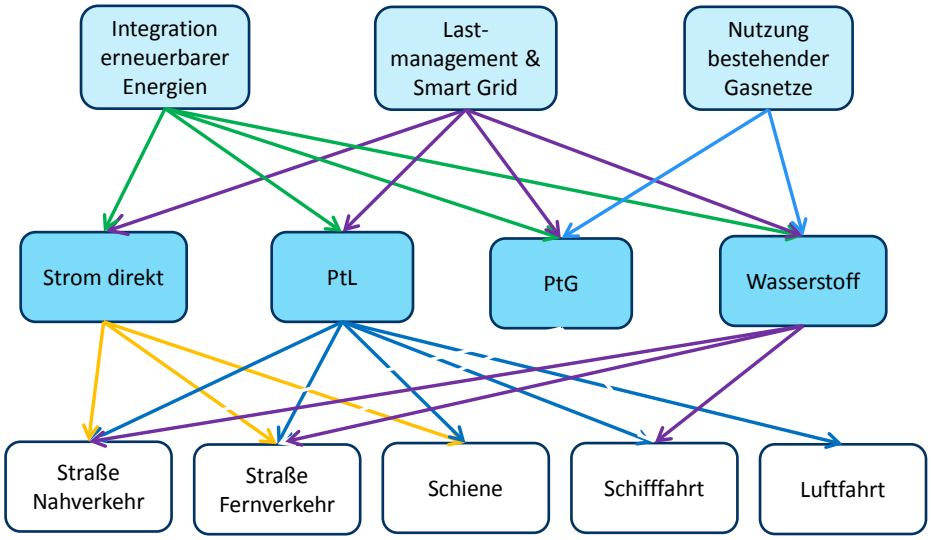
Eine andere Alternative stellt die kontinuierliche oder sequentielle Nachladung wie bei Oberleitungsfahrzeugen (Obus, Straßenbahn, Eisenbahn) oder induktiven Nachladestationen (neuartige E-Busse) dar. Für den Güterfernverkehr wird aktuell diese Option untersucht, die direkte Nutzung von Strom über Oberleitungen auf elektrifizierten Autobahnabschnitten (Siemens 2012). Die technische Machbarkeit wurde in diesem Rahmen nachgewiesen und erste Teststrecken auf öffentlichen Straßen werden vorbereitet. Oberleitungs-Lkw besitzen ähnlich hohe Wirkungsgrade wie batterieelektrische Fahrzeuge. Eine Unterscheidung kann darin gesehen werden, dass der Strombezug während der Traktion erfolgt und sich damit keine mit den Batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) vergleichbaren Flexibilitätsoptionen ergeben.

Dies verstärkt die in Teil B Kapitel 5.1 beschriebene Problematik der Notwendigkeit von Flexibilitätsoptionen im Stromsystem [St 8]. Zudem führt diese neuartige Kopplung des Verkehrssektors mit dem Stromsektor zu deutlichen Auswirkungen auf die Energiewirtschaft und ihrer Infrastruktur [St 2]. Die Stromnachfrage wird dadurch deutlich zunehmen, was zusätzlicher Erzeugungsanlagen bedarf. Auch zusätzliche Anlagen für die PtX-Erzeugung müssen installiert werden. Auf der anderen Seite können die Batteriespeicher der BEV durch gesteuerte Ladung in einem Smart Grid helfen, Fluktuationen in der Stromerzeugung auszugleichen, und somit dem Stromsektor als Flexibilitätsoption zur Verfügung stehen [Stra 2]. Auch die PtX-Erzeugung kann genutzt werden, um Stromspitzen abzufangen [Lu 6]. Durch die Nutzung von PtG in der Schifffahrt kann die gegebene Infrastruktur der Gasversorgung, welche sich von Auslastungsrisiken bedroht sieht [G 4], zumindest regional stärker ausgelastet werden.

Das Strategiepaket „Kopplung Energie – Verkehr" zielt also im Wesentlichen auf die Integration von Strom aus erneuerbaren Quellen in den Verkehrssektor unter Verwendung der sich daraus ergebenen Flexibilitätsoptionen für den Stromsektor ab.

Die beschriebenen Zusammenhänge der Kopplung Energie-Verkehr sind in Abbildung 43 dargestellt.

Abbildung 60: Wirkungsgefüge der Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr“



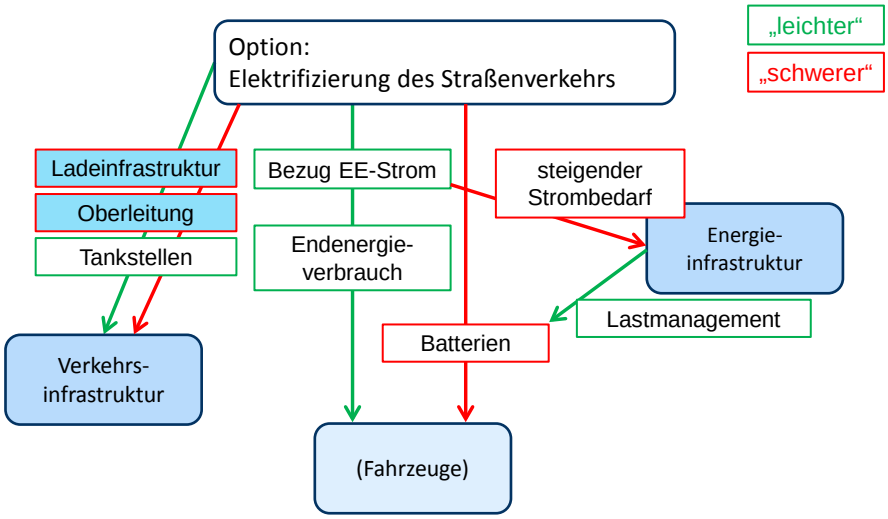

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Das Strategiepaket zielt im Wesentlichen auf die Reduzierung des Verbrauchs fossiler Kraftstoffe und die Nutzung von Energieträgern aus erneuerbaren Quellen im Verkehr ab. Daneben zielt es auf folgende der eingangs genannten Stellschrauben für Ressourcenleichtigkeit ab:

- Erhöhung der Nutzungsintensität (z. B. Auslastung von EE-Erzeugungsanlagen, Gasnetze)
- Multifunktionale Nutzungen (z. B. Nutzung der PtX-Kraftstoffe als Flexibilitätsoption, Lademanagement der Fahrzeugbatterien zur Netzentlastung)

Dabei ist insbesondere für den Güterverkehr die internationale Dimension von hoher Relevanz. In einem europäischen Kontext ist für den grenzüberschreitenden Güterverkehr eine Insellösungen mit Oberleitungsfahrzeugen schwer vorstellbar, zumal die Zweitverwertung der Fahrzeuge in europäischen Nachbarstaaten heute die Regel ist und eine kompatible Infrastruktur voraussetzt. Die Umsetzung erfordert demnach Abstimmung zwischen den Akteuren wie Verwaltung, Hersteller von Fahrzeugen und Infrastrukturkomponenten sowie Energieversorgungsunternehmen. Dabei stehen internationale Standards und koordinierte Ausbaupläne im Fokus.

Abbildung 61: Wirkungsgefüge „Elektrifizierung des Straßenverkehrs“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Das Strategiepaket „Kopplung Energie – Verkehr“ lässt sich in folgendem Bild aus dem Jahr 2050 resümieren:
Es hat keinen grundlegenden Wandel im Mobilitätsverhalten gegeben. Stattdessen hat die Gesellschaft auf technische Lösungsansätze gesetzt. Die Infrastruktur wurde ungebremst erweitert.
Im Verkehr haben sich elektrische Antriebskonzepte durchgesetzt, wo möglich wird elektrische Energie direkt genutzt. Wo dies nicht infrage kommt, finden in großem Maße stromgenerierte Kraftstoffe Anwendung.
Lademanagement und Flexibilität in PtX-Erzeugungsanlagen helfen, die Schwankungen in der Stromerzeugung zu puffern, weshalb weniger Stromspeicher errichtet wurden.

### 2.3.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen

Zur Übersichtlichkeit wurde die Fülle der Optionen bzw. Maßnahmen, die in dieser Fallstudie beispielhaft zur Implementation kommen, verschiedenen Bereichen und Dimensionen von Infrastruktursystemen zugeordnet:

Maßnahmen im Strategiepaket „Kopplung Energie – Verkehr“ – Bereich Energie

- Konsequenter Ausbau Erneuerbarer Energien (z. B. 80 % EE in der Stromversorgung bis 2050): insbesondere Windkraft und PV-Anlagen (weitere Optimierungen und Effizienzsteigerungen (positive Lernkurveneffekte) sowie Kostenreduktion bei beiden Erzeugungsarten wahrscheinlich) (vgl. Agora, Fraunhofer-ISE 2015)
- Grundsätzlich ist hinsichtlich der Stromnetze eine Abwägung zwischen Ausbau und anderen Maßnahmen wie Lastmanagement und Speicherkapazitäten notwendig.
- Gasnetze: Erhaltung und ggf. Anpassung bestehender Gasnetze zur Aufnahme von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff und Methan (Mischung konditionierter Gase verschiedener Herkunft).
- Nutzung der Energiespeicher batterieelektrischer Fahrzeuge zum Ausgleich von Fluktuationen in der Erzeugung (vgl. Strategiepaket Intelligent gekoppelte Stadttechnik).
- Optimiertes („smartes“) Lastmanagement unter Einbezug der Batteriekapazität der BEV/PHEV (Lademanagement) und PtX-Erzeugung.

- Nutzung existierender Speicher wie z. B. Gasspeicher und möglichst nur geringer Ausbau von stationären (Strom-)Speicherkapazitäten .
- Mischung konditionierter Gase verschiedener Herkunft; z. B. Einspeisung von Wasserstoff, synthetisches Methan ins Gasnetz (PtG).

Maßnahmen im Strategiepaket „Kopplung Energie – Verkehr“ – Bereich Verkehr

- Direkte Nutzung von Strom im Straßenverkehr durch den konsequenten Einsatz von elektrifizierten Fahrzeugen im Nahverkehr bei Pkw, leichten Nutzfahrzeugen, Lkw im Lieferverkehr und Stadtbussen. Die Elektrifizierung erfolgt in Form von batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (PHEV). Aber auch durch Ausbau der Straßenbahnen.
- Einsatz von PtL-Kraftstoffen in Plug-In-Hybridfahrzeugen.
- Netzintegrierte Hybridfahrzeuge (Oberleitung) bei Lkw und Reisebussen im Fernverkehr.
- Erhöhung des elektrischen Fahrleistungsanteils durch den Einsatz von Hybridfahrzeugen, welche temporäres oberleitungsfreies Fahren auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten ermöglicht.
- Einsatz von PtL-Kraftstoffen im Schienenverkehr. Aber auch weitere Elektrifizierung von Schienenstrecken.
- Einsatz von verflüssigtem, synthetischem Methan (PtG) in der Schifffahrt.
- Einsatz von PtL-Kraftstoffen in der Luftfahrt.

Maßnahmen im Strategiepaket „Kopplung Energie – Verkehr“ – Bereich Governance

- Internationale Standards und Richtungsentscheidungen für Länderübergreifende Verkehre notwendig.
- Überregionale Planung für den strategischen Ausbau elektrifizierter Autobahnabschnitte.

### 2.3.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie

Nicht alle der zuvor genannten Optionen und Maßnahmen können für die Berechnungen im Rahmen der orientierenden Stoffstromanalyse mit Daten unterlegt und operationalisiert werden. Für einzelne Maßnahmen ist die Wirkung auf Ressourcenleichtigkeit kann nicht quantifiziert bzw. allenfalls in empirischen Studien fallweise zu bestimmt werden. Vor dem Hintergrund der hohen Aggregationsebene der Analysen im Rahmen des Vorhabens RELIS wurden aus den o. g. Optionen und Maßnahmen folgende Annahmen zur Entwicklung der Infrastrukturbestände abgeleitet:

- Der erhöhte Energiebedarf durch den steigenden Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge führt zu einem größeren **Kraftwerkspark** und wird mit 100 % Erneuerbaren Energien gedeckt. Hierbei findet die Aufteilung nach Windkraft und Photovoltaik nach dem in 2050 vorherrschenden Schlüssel im AMS statt. Im Vergleich zum Referenzszenario steigt die installierte Leistung der Windkraft- und Photovoltaikanlagen um 33 %.
- Die **Übertragungsnetze** werden proportional zum Zuwachs des gesamten Energiebedarfs skaliert. Dies führt zu 18 % mehr Übertragungsnetzkilometern in 2050.
- Auch die **Ladeinfrastruktur** erfährt durch den hohen Zuwachs an elektrischen Pkw einen massiven Ausbau im Verhältnis zum Referenzszenario mit einem fast 50-fachen Angebot (nach Kasten et al. 2015).
- Hinzukommen kommen außerdem **Oberleitungen** auf den Bundesautobahnen für den Betrieb von Oberleitungs-Lkws. Die Ausbauzahlen sind dem Forschungsprojekt ENUBA 2 (Siemens 2016) entnommen. Bis 2050 wird von 4.000 km elektrifizierter Autobahn ausgegangen.

### 2.3.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

Grundsätzlich setzt die Fallstudie an der Kopplung Energie-Verkehr an. Die direkte Nutzung elektrischer Energie sowie stromgenerierter Kraftstoffe im Verkehrssektor haben hohe Implikationen auf den Gesamtstrombedarf. Der zusätzliche Strombedarf wird in der Fallstudie allein über erneuerbare Energien gedeckt, was zusätzliche Erzeugungsanlagen und eine Erweiterung des Netzes voraussetzt. Der IKT-Sektor und die Siedlungswasserwirtschaft weisen in der Fallstudie keine Veränderungen zum Referenzszenario auf.

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr" sind in den anschließenden Tabellen und den folgenden Grafiken abgebildet. Dabei wird nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 differenziert.

Tabelle 9: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie" nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau- und Unterhalt | Verkehr | 101 | 108 | 110 | 270 | 285 | 290 | 11 | 12 | 12 |
| | IKT | 9 | 11 | 15 | 5 | 7 | 10 | 0 | 0 | 1 |
| | Wasser/Abwasser | 42 | 46 | 47 | 27 | 29 | 30 | 2 | 2 | 2 |
| | Energie | 43 | 51 | 61 | 89 | 124 | 161 | 6 | 8 | 10 |
| | *Zwischensumme* | **196** | **216** | **232** | **391** | **446** | **491** | **19** | **22** | **25** |
| Bauaufwendungen | Verkehr | 4,2 | 3,2 | 1,8 | 54,5 | 45,4 | 24,4 | 5,5 | 4,2 | 2,1 |
| | IKT | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,35 | 0,54 | 0,77 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| | Wasser/Abwasser | 0,14 | 0,12 | 0,08 | 1,95 | 1,83 | 1,19 | 0,19 | 0,16 | 0,10 |
| | Energie | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,91 | 0,70 | 0,58 | 0,08 | 0,06 | 0,04 |
| | *Zwischensumme* | **4,4** | **3,3** | **1,9** | **57,7** | **48,5** | **26,9** | **5,8** | **4,5** | **2,3** |
| Betrieb | Verkehr | 1,7 | 1,3 | 0,8 | 22,1 | 19,4 | 11,4 | 2,2 | 1,8 | 1,0 |
| | IKT | 5,4 | 7,0 | 5,9 | 69,2 | 98,8 | 79,1 | 7,1 | 9,3 | 7,0 |
| | Wasser/Abwasser | 3,1 | 1,9 | 1,0 | 39,8 | 27,3 | 13,0 | 4,1 | 2,6 | 1,2 |
| | Energie | 22,4 | 15,6 | 10,0 | 262,9 | 201,0 | 127,1 | 30,0 | 21,4 | 12,7 |
| | Zwischensumme | **33** | **26** | **18** | **394** | **346** | **231** | **43** | **35** | **22** |
| Summe | | **233** | **245** | **252** | **843** | **841** | **748** | **68** | **62** | **49** |
| *Nutzung*[1)] | *Kraftwerke (fossil)* | *243* | *166* | *79* | *3.112* | *2.373* | *1.165* | *341* | *244* | *112* |

[1)] **Hinweis:** Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 10: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Sektor | Versiegelte Fläche in 1.000 ha | | |
|---|---|---|---|
| | 2012 | 2030 | 2050 |
| Verkehr | 479 | 504 | 509 |
| IKT | 0,1 | 0,3 | 0,4 |
| Wasser/Abwasser | 14 | 14 | 13 |
| Energie | 10 | 9 | 10 |
| **Summe** | **502** | **526** | **533** |
| | **Abweichung gegenüber dem Referenzszenario in 1.000 ha** | | |
| Verkehr | 0 | -1 | -3 |
| IKT | 0 | 0 | 0 |
| Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 |
| Energie | 0 | 0 | 2 |
| **Insgesamt** | **0** | **-1** | **-1** |

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 11: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau und Unterhalt | Verkehr | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | IKT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Energie | 0 | 0 | 6 | 0 | 0 | 28 | 0 | 0,0 | 2 |
| | *Zwischensumme* | **0** | **0** | **6** | **0** | **0** | **29** | **0** | **0** | **2** |
| Bau-aufwendungen | Verkehr | 0 | 0,0 | -0,4 | 0 | 0,0 | -4,8 | 0 | 0,0 | -0,4 |
| | IKT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0,0 | -0,01 | 0 | 0,00 | -0,16 | 0 | 0,00 | -0,01 |
| | Energie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | *Zwischensumme* | **0** | **0,0** | **-0,4** | **0** | **0,0** | **-4,9** | **0** | **0,0** | **-0,4** |
| Betrieb | Verkehr | 0 | 0,0 | -0,2 | 0 | 0,0 | -2,1 | 0 | 0,0 | -0,2 |
| | IKT | 0 | 0,0 | -1,3 | 0 | 0,0 | -17,0 | 0 | 0,0 | -1,5 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0,0 | -0,2 | 0 | 0,0 | -2,8 | 0 | 0,0 | -0,2 |
| | Energie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Zwischensumme | **0** | **0** | **-2** | **0** | **0** | **-22** | **0** | **0** | **-2** |
| Summe | | **0** | **0** | **4** | **0** | **0,3** | **2** | **0** | **0,0** | **-0,6** |
| *Nutzung[1)]* | *Kraftwerke (fossil)* | *0* | *-4* | *-28* | *0* | *-37* | *-249* | *0* | *-4* | *-24* |

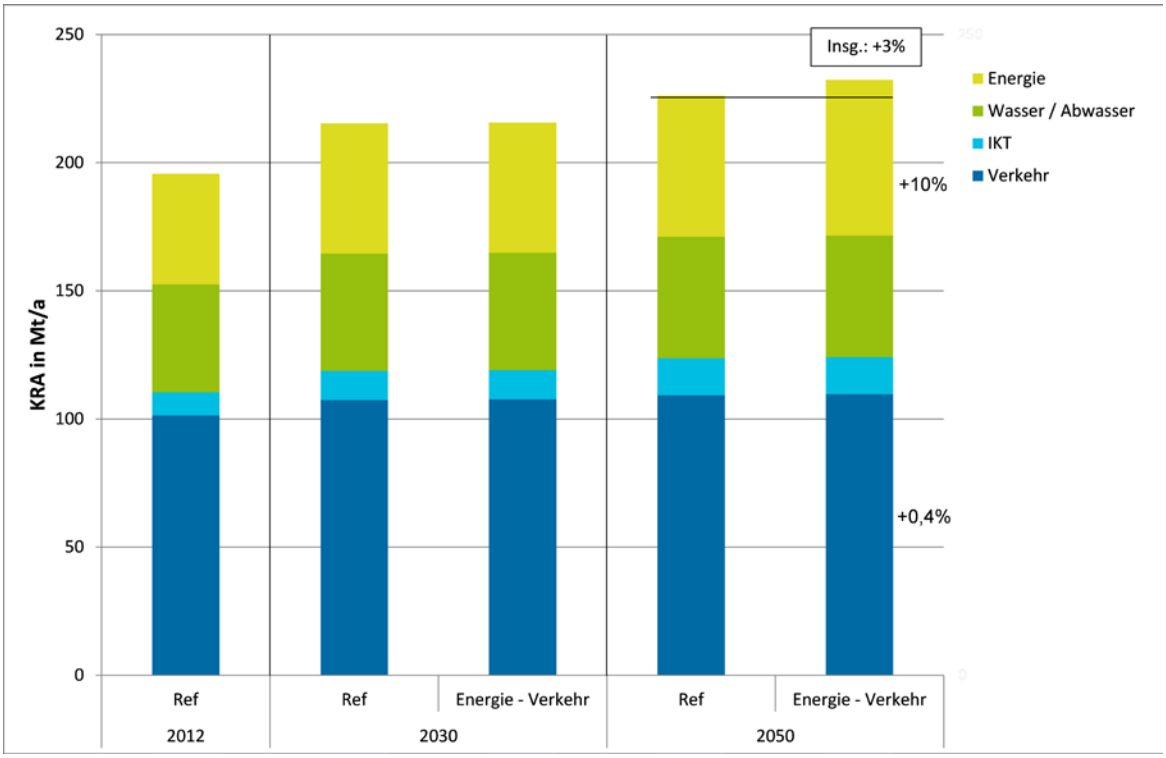
[1)] **Hinweis:** Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Eigene Berechnung.

Zur besseren Darstellung wird im Weiteren neben den absoluten Beträgen in den einzelnen Infrastrukturbereichen auch die Differenz gegenüber dem Referenzszenario ausgewiesen.

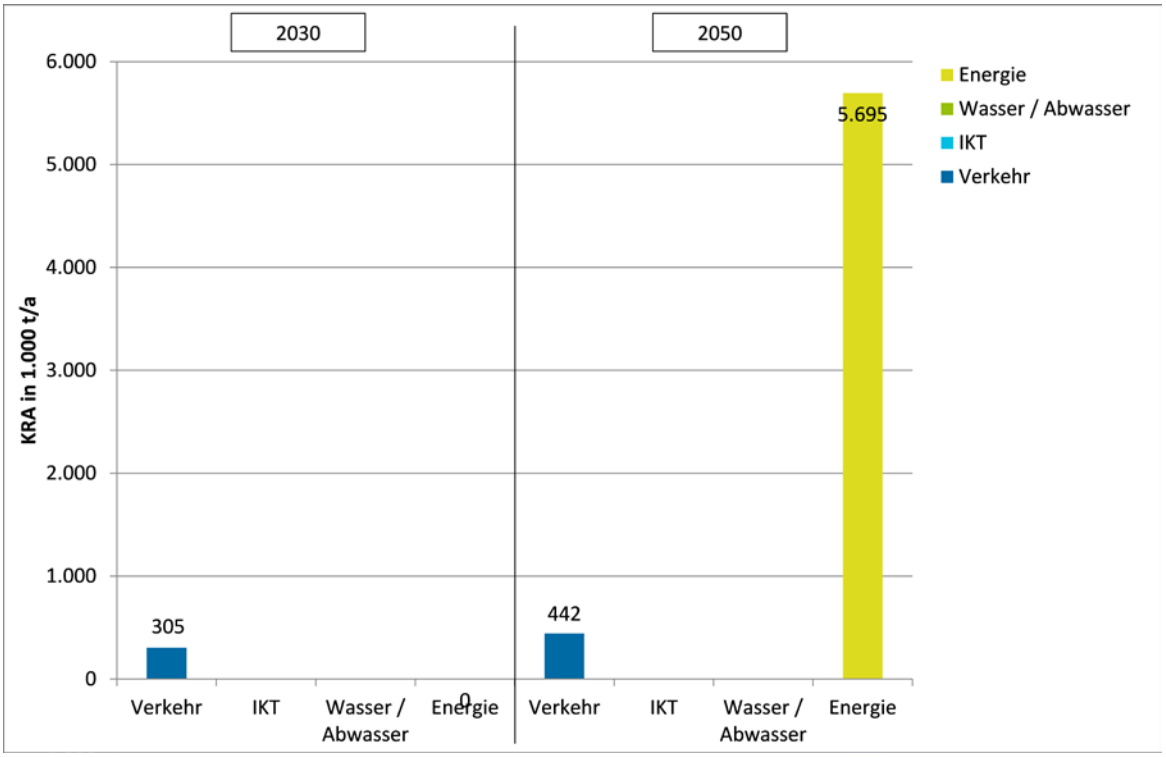
Der **KRA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur verändert sich in dieser Fallstudie bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario nur leicht, wobei sich insbesondere die starke Zunahme im Energiesektor von 10 % auswirkt. Der KRA der Verkehrsinfrastruktur sinkt hingegen minimal um 0,4 %. Insgesamt führt die Fallstudie im Jahr 2050 zu einem zusätzlichen kumulierten Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur gegenüber dem Referenzszenario von rund 6,1 Millionen t/a (vgl. Abbildung 62 und Abbildung 63). Nicht dargestellt ist eine Reduktion des KRA durch die höhere Energieeffizienz der Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien in Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen und der zusätzlichen Ressourceninanspruchnahme durch die Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten. Letzteres ist in einem Exkurs in Teil C Kapitel 2.3.5 abgeschätzt. Eine Abschätzung der Reduktion des Endenergieverbrauchs gegenüber dem Referenzszenario wird in einem weiteren Exkurs in Kapitel Teil C 2.4.5 durchgeführt.

Abbildung 62: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

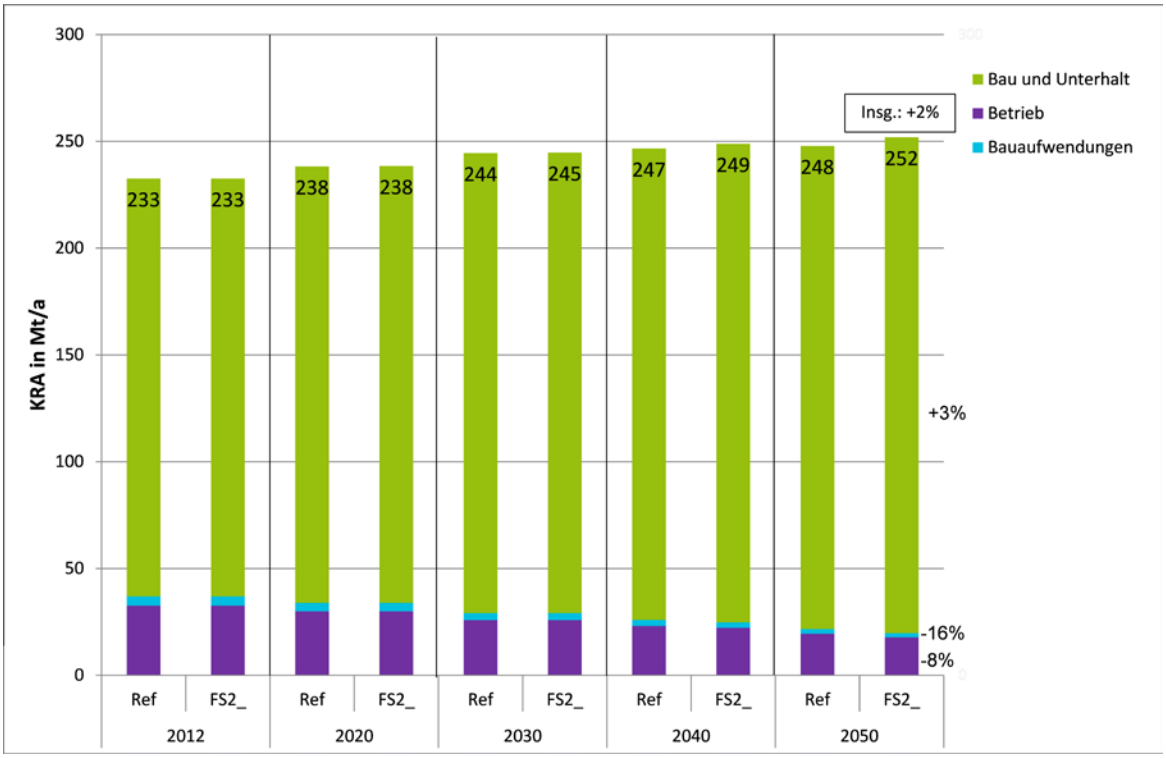
Abbildung 63: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie"; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Der im Vergleich zum Referenzszenario höhere Anteil erneuerbarer Energien im Strommix in Fallstudie Kopplung Energie – Verkehr führt sowohl auf Seiten der Bauaufwendungen als auch beim Betrieb der Infrastruktur zu einem niedrigerem KRA. Dies ist darin begründet, dass der zusätzliche Strombedarf durch die stärkere Nachfrage im Verkehrssektor ausschließlich durch Strom aus Windkraft und Photovoltaik gedeckt wird. Die fossile Nettostromerzeugung bleibt konstant, so dass der spezifische KRA pro kWh Strom abnimmt. Der KRA durch die Bauaufwendungen liegt rund 0,4 Mt/a (-16 %), der durch den Betrieb um 1,6 Mt/a (-8 %) unter dem Referenzszenario. Insgesamt liegt der KRA in dieser Fallstudie im Jahr 2050 zwei Prozent über dem Referenzszenario.

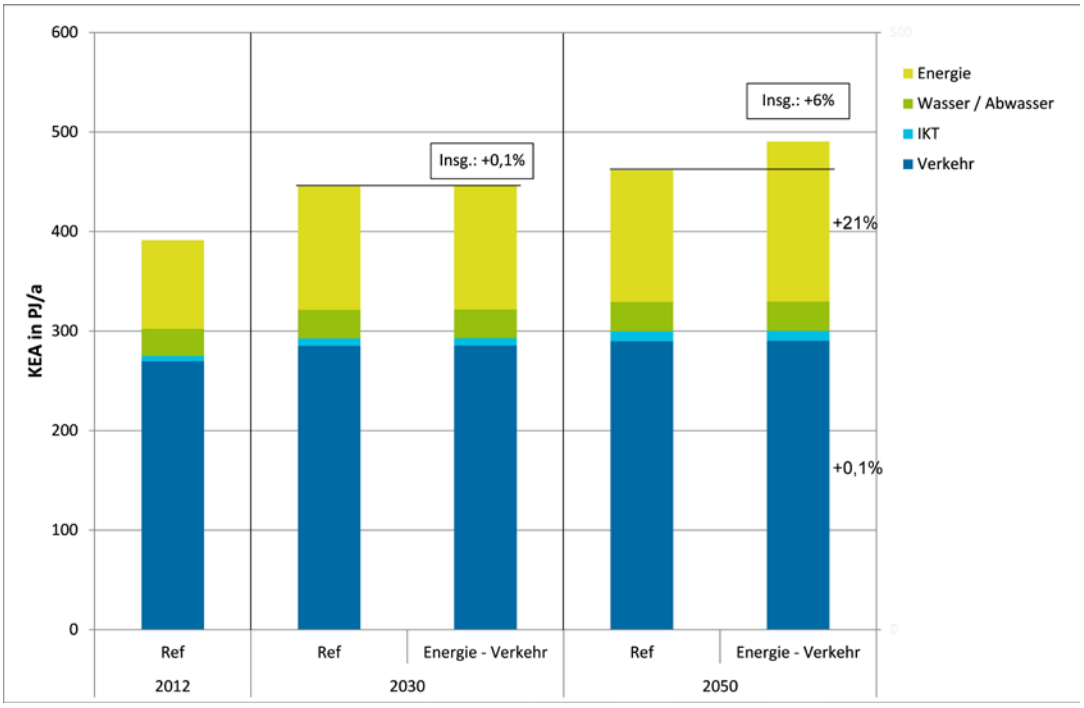
Abbildung 64: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

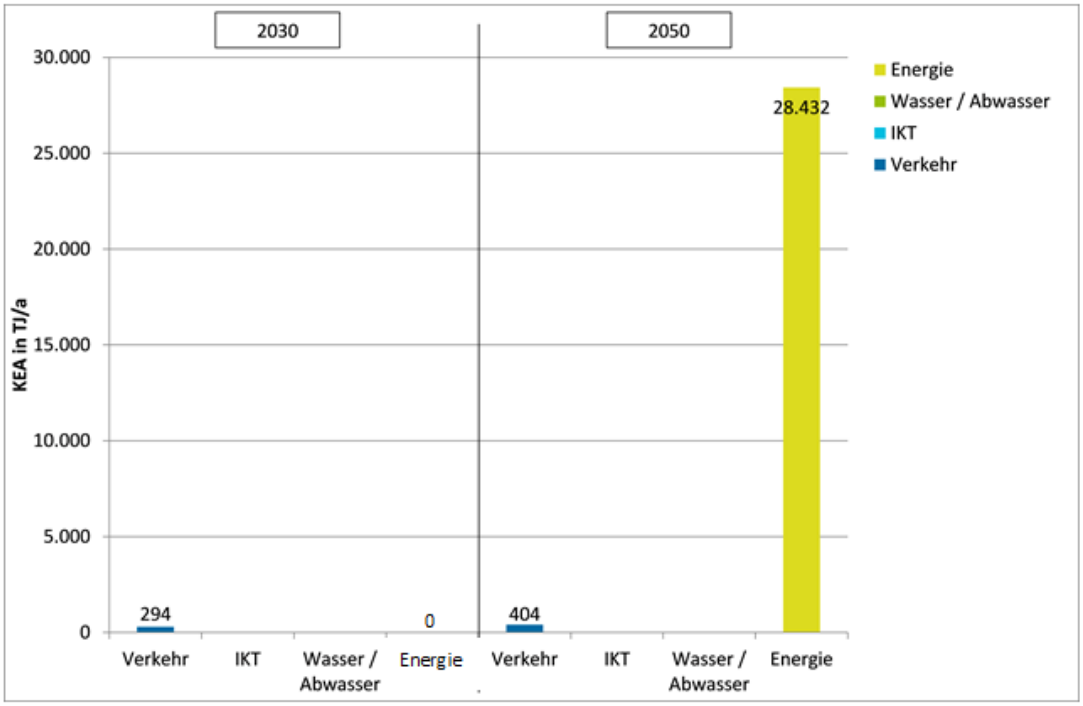
Beim **KEA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur fällt die Zunahme mit insgesamt rund sechs Prozent bis zum Jahr 2050 noch deutlicher aus. Der Großteil der Zunahme entfällt auf den Energiesektor, dessen KEA alleine um rund 21 % bzw. rund 28 PJ/a ansteigt (vgl. Abbildung 65 und Abbildung 66). Die Minderung im Verkehrssektor fällt dabei mit 400 TJ/a vernachlässigbar aus.

Abbildung 65: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

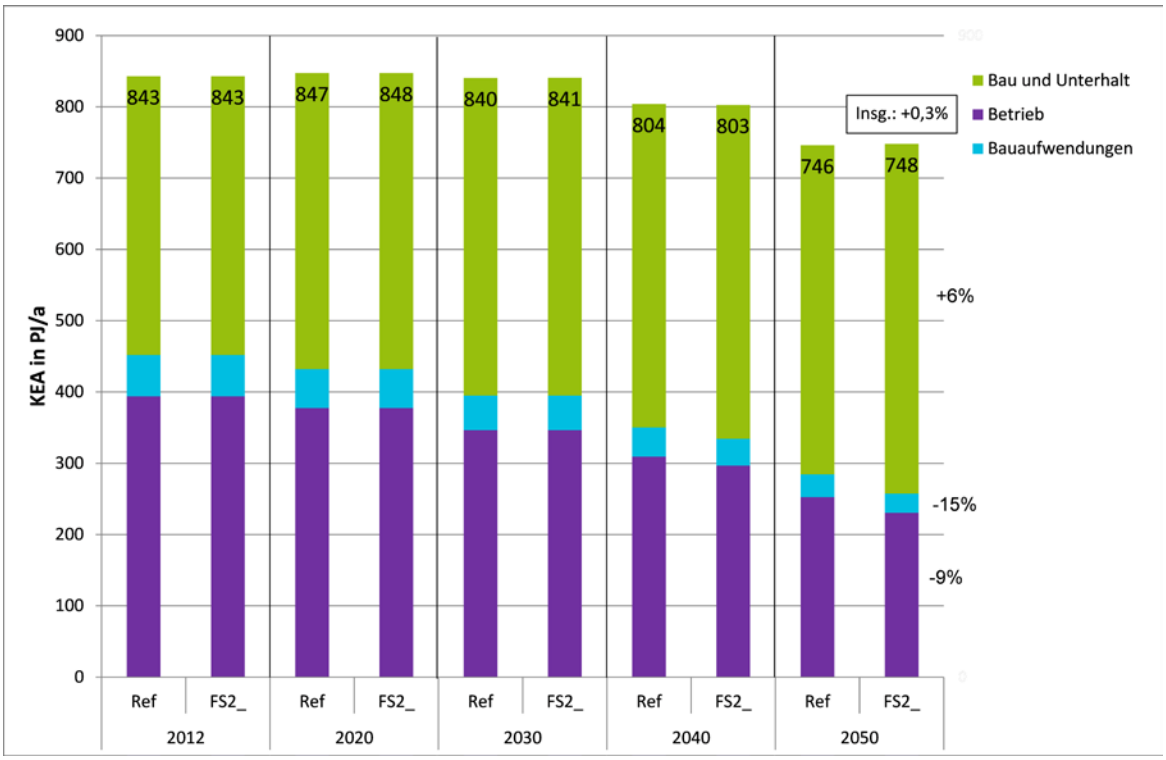
Abbildung 66: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Während der KEA durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie deutlich über dem Referenzszenario liegt (+6 %), führt ein im Vergleich zum Referenzszenario geringerer KEA durch Bauaufwendungen und Betrieb dazu, dass sich insgesamt kaum Änderungen ergeben. Mit insgesamt 748 PJ/a im Jahr 2050 liegt der KEA 0,3 % bzw. 2 PJ/a über dem Referenzszenario.

Abbildung 67: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario

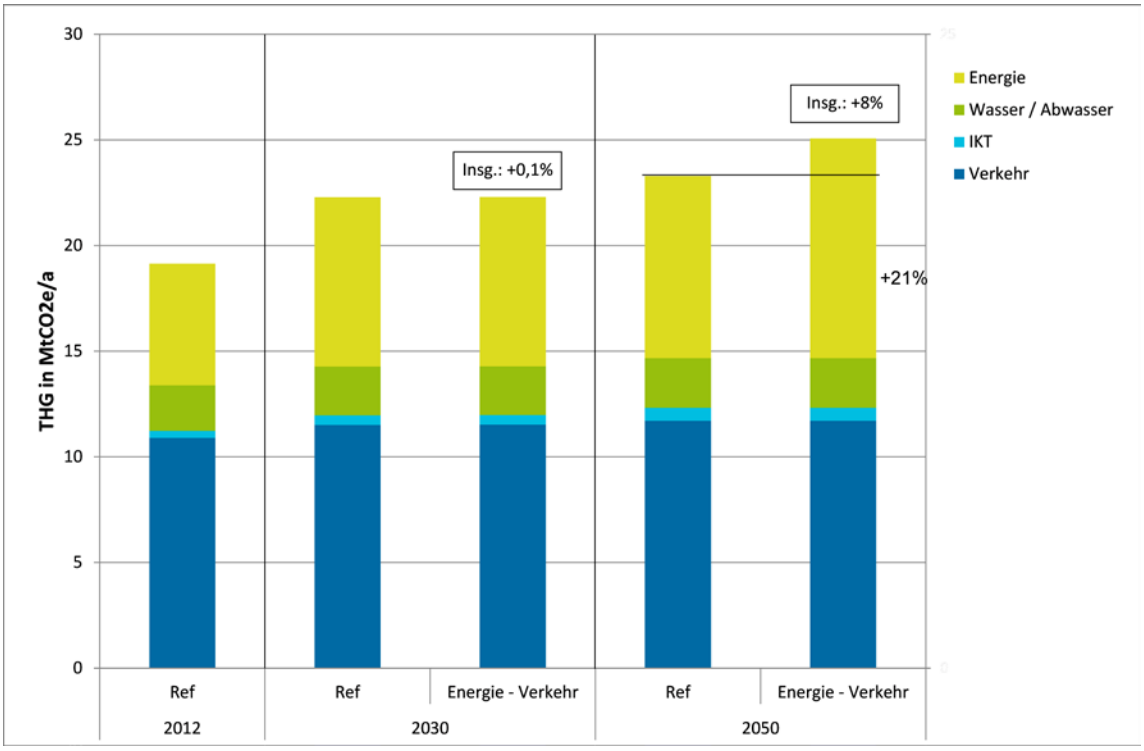



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Im Exkurs in Teil C Kapitel 2.3.5 wird der KEA abgeschätzt, der mit den Materialbedarfen der neu zugelassenen Fahrzeuge in den Fallstudien verbunden ist. Dieser KEA liegt aufgrund von unterschiedlichen Materialbedarfen in der Fallstudie um 80 PJ/a bzw. 31 % über dem Referenzszenario. Demzufolge ist die Produktion der Fahrzeuge von besonderer Relevanz für den KEA. Allerdings ergeben sich durch den Einsatz der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben deutliche Energieeinsparungen im Betrieb. Im Exkurs in Teil C Kapitel 2.4.5 betragen die Einsparungen des Endenergieverbrauches im Verkehr in dieser Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario rund 500 PJ/a (ohne PtX). Geht man allerdings davon aus, dass es sich bei der Hälfte der noch verwendeten Kraftstoffe um PtX-Kraftstoffe handelt, führen die Verluste durch die Elektrolyse, Synthese, $CO_2$- Quelle und Transport nur noch zu Einsparungen in Höhe von rund 90 PJ/a im Vergleich zum Referenzszenario.

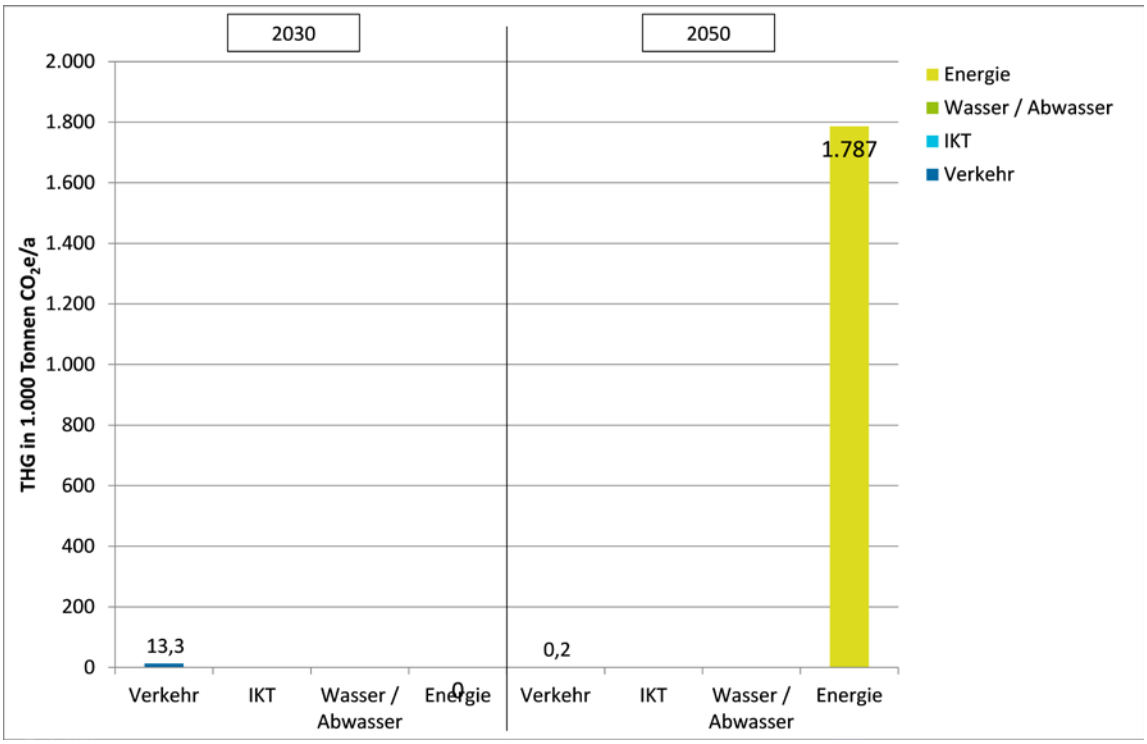
Bei den **THG**–Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur steigen die Emissionen für die Energieinfrastrukturen im Jahr 2050 um 21 %, die THG-Emissionen der Verkehrsinfrastruktur bleiben in etwa konstant. Insgesamt liegen die Treibhausgasemissionen in 2050 mit rund 25 Millionen t $CO_2$ äq/a etwa 8 % über dem Referenzszenario (vgl. Abbildung 68 und Abbildung 69).

Abbildung 68: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

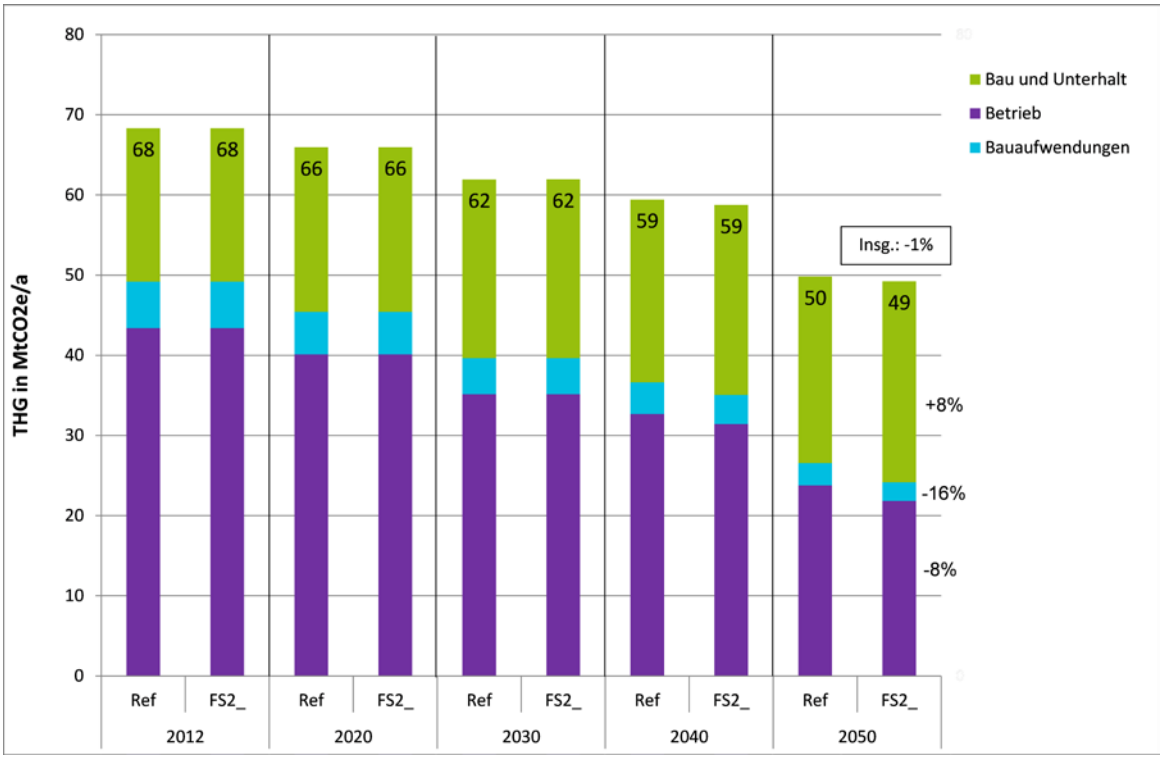
Abbildung 69: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Unter Einbezug der Bauaufwendungen und des Betriebes der Infrastruktur ergibt sich im Jahr 2050 in der Fallstudie eine leichte Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzszenario. Insgesamt liegen diese rund 600.000 t $CO_2$ äq/a (-1,2 %) unter dem Referenzszenario (vgl. Abbildung 70).

Abbildung 70: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario

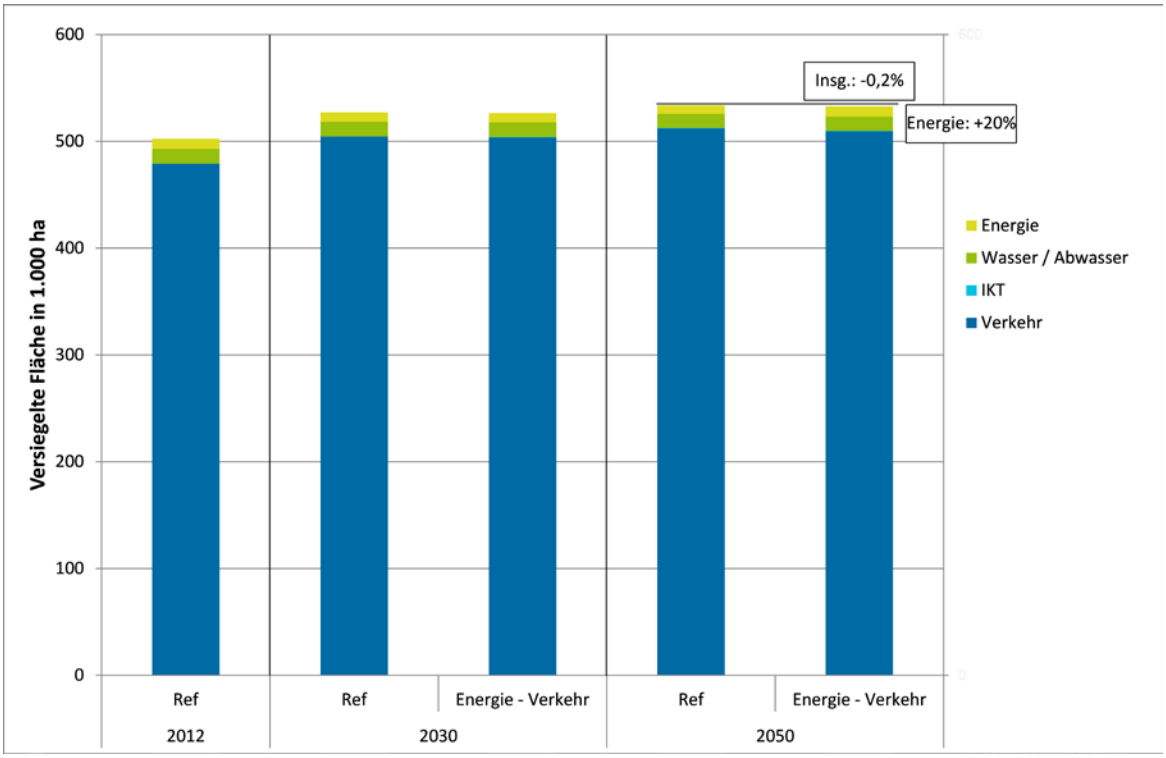



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Unberücksichtigt bleibt dabei, dass es zu deutlichen Emissionsreduktionen kommt, da die Fahrzeuge zu einem großen Teil elektrisch betrieben werden und somit große Mengen an fossilen Kraftstoffen eingespart werden. Andererseits führt die Elektrifizierung der Fahrzeuge zu einer zusätzlichen Ressourceninanspruchnahme z. B. durch die Batteriespeicher, welche ebenfalls mit Treibhausgasemissionen verbunden sind. Im Jahr 2050 verursachen die neu zugelassenen Fahrzeuge mit 21 Mt $CO_2$ äq/a rund 5 Mt $CO_2$ äq/a zusätzlich (vgl. Exkurs in Teil C Kapitel 2.3.5). Diese zusätzlichen Emissionen übersteigen die Einsparungen in der Fallstudie um ein Vielfaches. Die Einsparungen auf Seiten des Betriebes gleichen dies jedoch mehr als aus (vgl. Exkurs in Teil C Kapitel 7.4.5).

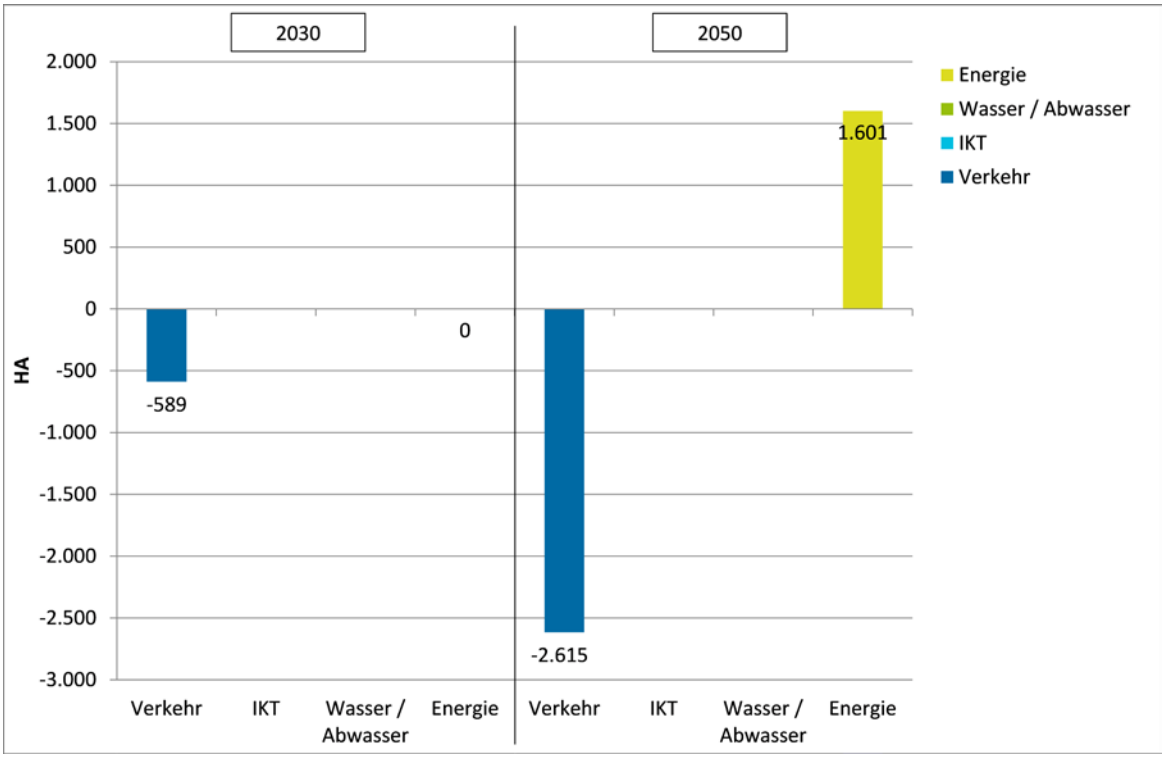
Hinsichtlich der **Flächeninanspruchnahme** (versiegelte Fläche) gibt es in dieser Fallstudie keine signifikante Veränderung gegenüber dem Referenzszenario. Während die Energieinfrastruktur eine zusätzliche Inanspruchnahme von rund1.600 ha aufweist wird dies durch einen um rund 2.600 ha niedrigere Inanspruchnahme auf Seiten der Verkehrsinfrastruktur überkompensiert.

Abbildung 71: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

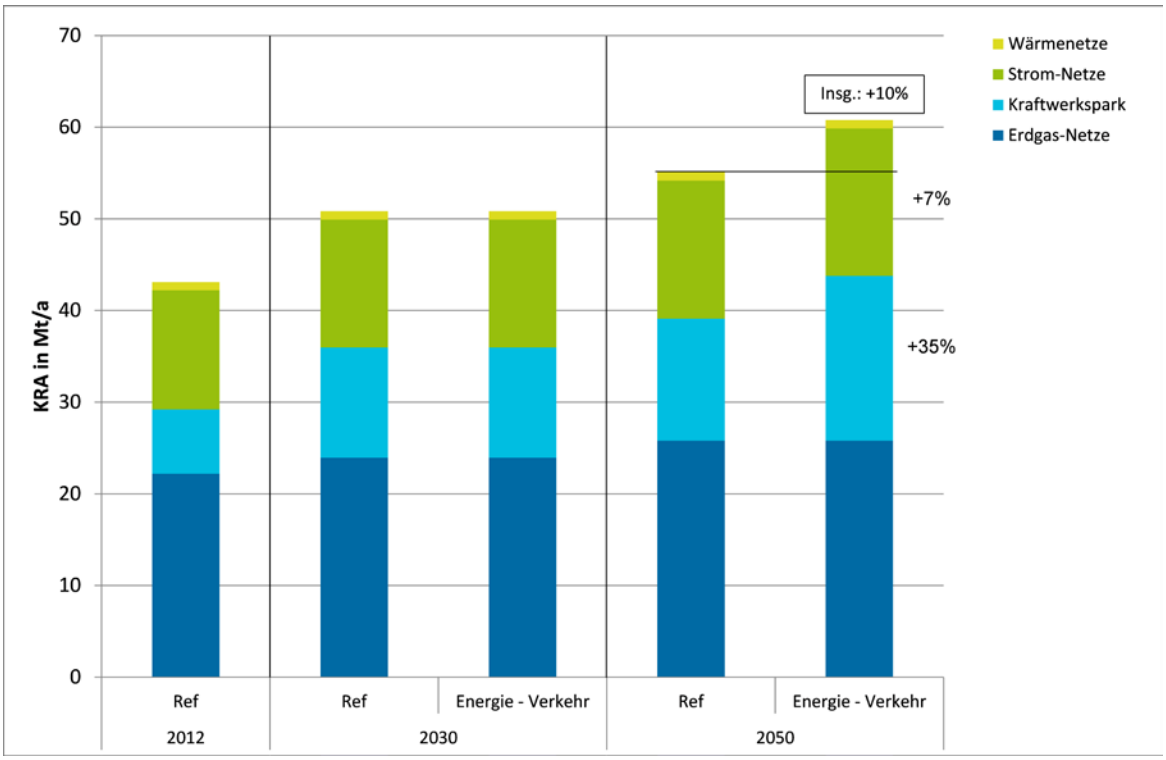
Abbildung 72: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

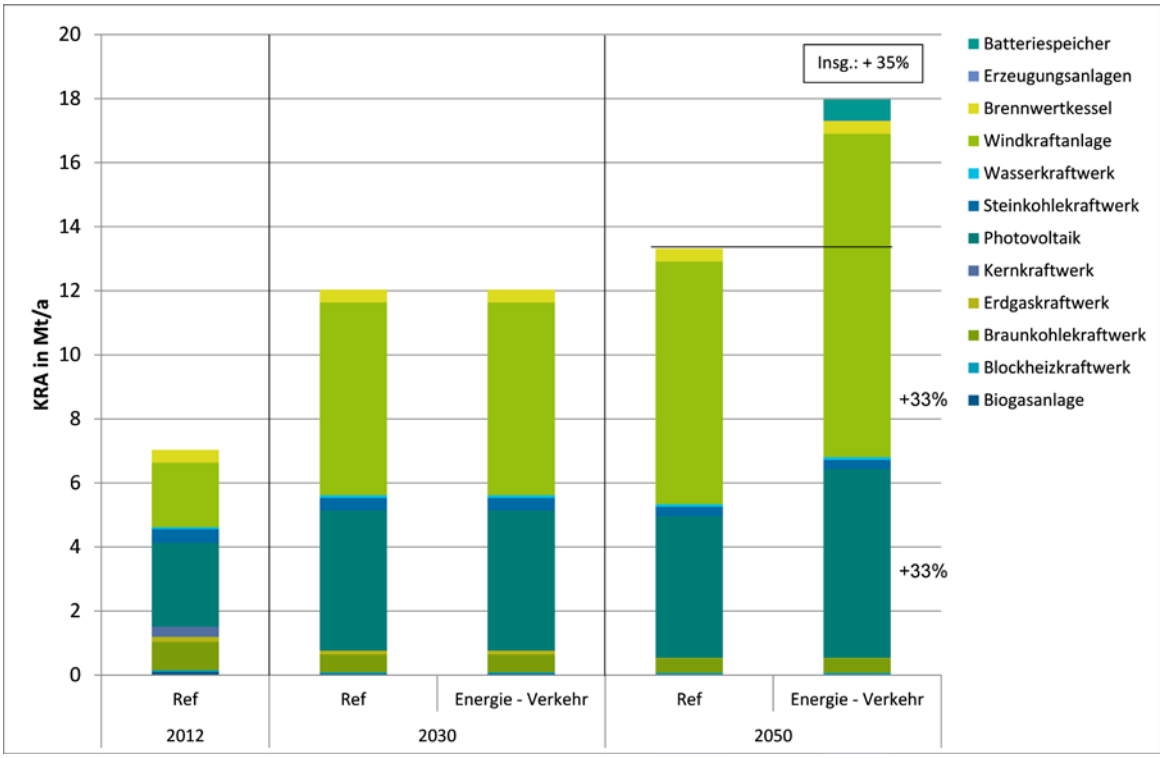
Die folgenden Detailabbildungen für die Energieversorgungsinfrastruktur und den Kraftwerkspark (Abbildung 73 und Abbildung 74) zeigen, dass der kumulierte Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur sowohl auf Seiten des Übertragungsnetzes (7 %) als auch auf Seiten des Kraftwerkspark (35 %) steigt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die zusätzlichen Erzeugungsanlagen für Herstellung der importierten PtX-Kraftstoffe nicht erfasst sind. Konkret liegt der KRA der Windkraftanlagen und der der Photovoltaikanlagen im Jahr 2050 33 % über dem Referenzszenario. Durch die zusätzlichen Batteriespeicher ergibt sich zu dem ein zusätzlicher KRA von rund 650.000 t/a.

Abbildung 73: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ für die Energieversorgungsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 74: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ für den Kraftwerkspark und Speicher im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.3.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

In dieser Fallstudie wurden eine Elektrifizierung des Verkehrssektors und der zunehmende Einsatz von PtL-Kraftstoffen in der orientierenden Stoffstromanalyse untersucht. Effekte hinsichtlich der betrachteten Indikatoren können auf Seite der Energie- und Verkehrsinfrastruktur beobachtet werden.

Bei der Verkehrsinfrastruktur kommen neuartige Infrastrukturkomponenten wie Ladeinfrastruktur und Oberleitungssystem sowie ein abnehmender Tankstellenbestand zum Tragen. Auf Seite der Energieinfrastruktur erfolgt ein Ausbau an Erzeugungsanlagen (Windenergie, Photovoltaik), Übertragungsnetze, PtL-Erzeugungsanlagen und stationäre Batteriespeicher.

Unter Berücksichtigung von Bau und Unterhalt, den Bauaufwendungen und dem Betrieb der Infrastruktur verändern sich die betrachteten Parameter in dieser Fallstudie leicht gegenüber dem Referenzszenario:

Insgesamt führt die Fallstudie im Jahr 2050 zu folgenden Abweichungen:

- KRA: +2 %;
- KEA: +0,3 %,
- THG: -1 %. und
- Flächeninanspruchnahme (versiegelte Fläche): -0,2 %.

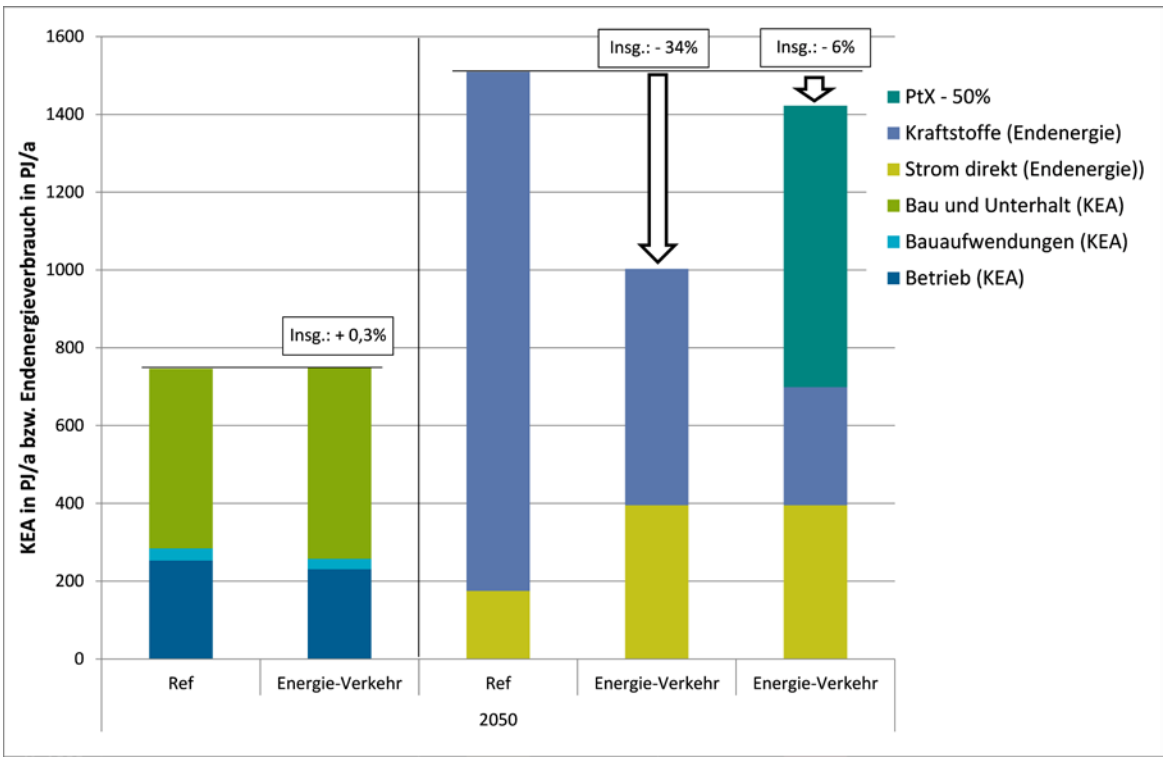
Bei der Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich KRA, KEA und THG ist es entscheidend sich vor Augen zu führen, dass allein der durch die Infrastruktur verursachte kumulierte Energieverbrauch bzw. die THG-Emissionen dargestellt sind. Der Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen aus dem Fahrzeugbetrieb sind nicht Teil der dargestellten Ergebnisse. Die durch den Fahrzeugbetrieb verur-

sachten Energieverbräuche sind deutlich höher, wie man der Abbildung 75 entnehmen kann. Durch den Einsatz der elektrischen Fahrzeuge in der Fallstudie wird deren spezifischer Endenergieverbrauch deutlich reduziert. Grund dafür sind zum einen höhere Motorenwirkungsgrade sowie die Möglichkeit zur Bremsenergierückgewinnung. Der Verbrauch eines mittleren batterieelektrischen Pkw lag beispielsweise in 2010 mit 0,67 MJ/km rund 65 % unter dem eines Pkw mit Diesel-Motor (1,95 MJ/km) (Hülsmann et al. 2014). Die dargestellten Mehrverbräuche auf Seiten der Infrastruktur ermöglichen also erst den Einsatz effizienter Fahrzeuge, die mit erneuerbar erzeugtem Strom betrieben werden und damit zu deutlich niedrigeren Treibhausgasemissionen führen.

Die nachfolgende Abbildung 75 verdeutlicht, dass die Fallstudie zur Zielgröße Ressourcenleichtigkeit beiträgt, zwar nehmen KRA und KEA der Infrastruktur leicht zu. Neben dem kumulierten Energieaufwand für die Verkehrsträger ist für das Jahr 2050 zusätzlich die Abschätzung bezüglich des Endenergieverbrauchs (einschließlich der Umwandlungsverluste durch die PtL-Bereitstellung) dargestellt. Während der kumulierte Energiebedarf in der Fallstudie im Jahr 2050 um 0,3 % bzw. 2 PJ/a über dem Referenzszenario liegt, wird auf Seiten des Endenergieverbrauchs aus dem Fahrzeugbetrieb eine Reduktion um rund 90 PJ/a ermöglicht (-6 %) (Abbildung 75).

Der Endenergieverbrauch[72] aus dem Fahrzeugbetrieb des Verkehrssektors sinkt in dieser Fallstudie von rund 1.500 Pt/a im Jahr 2050 (Referenzszenario) um 6 % bzw. rund 90 PJ/a auf 1.420 PJ/a. Würde auf den Einsatz von PtX-Kraftstoffen verzichtet läge das Effizienzpotenzial in der Fallstudie sogar bei 34 % bzw. 500 PJ. Dies bedeutet, dass die Fallstudie gemäß der Definition ressourcenleicht ist (da ressourcenleicht auch den Betrieb umfasst).

Abbildung 75: Kumulierter Energieaufwand in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich und Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

72 Unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste der PtX-Bereitstellung.

Gleiches gilt für den KRA, da in der Darstellung zwar zusätzliche Ressourceninanspruchnahme für neue Erzeugungsanlagen enthalten ist, nicht jedoch die reduzierte Nachfrage nach fossilen Kraftstoffen. Auf der anderen Seite bleibt die veränderte Fahrzeugzusammensetzung in der Darstellung unberücksichtigt. Insbesondere bei den Fahrzeugbatterien und Elektromotoren werden jedoch Rohstoffe wie Lithium und Neodym verwendet, deren Verfügbarkeit eingeschränkt ist bzw. deren (aktuelle) Förderung mit erheblichen Folgen z. B. durch radioaktiven Abraum verbunden ist. Weiterhin finden zunehmend Materialien wie Kupfer und Titan Anwendung, deren Bereitstellung energieintensiv ist. Die daraus resultierenden Auswirkungen werden im folgenden Exkurs skizziert.

**Exkurs: Materialbedarf der Fahrzeuge im Straßenverkehr**

In den Fallstudien „Kopplung Energie-Verkehr“ (Fallstudie 2) und „Innovationen im Verkehr“ (Fallstudie 3) in Teil C Kapitel 2.3 und 2.4 sowie der Szenarette „Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung“ (Teil C Kapitel 3.3.2) führen die umgesetzten Maßnahmen zu einer gegenüber dem Referenzszenario veränderten Zusammensetzung und Höhe des Fahrzeugbestandes. Treiber sind eine stärkere Durchdringung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten (z. B. Batterieelektrische Fahrzeug (BEV), Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV), Range-Extender-Fahrzeuge (REEV) und Oberleitungs-Hybrid-Fahrzeugen) mit neuen Komponenten wie z. B. Batteriespeicher und Elektromotoren (Fallstudie 2, Szenarette). Zudem führt die Verkehrsvermeidung, -verlagerung und die bessere Auslastung der Fahrzeuge zu einem im Vergleich zum Referenzszenario geringerem Pkw-Bestand bzw. höherem Bestand an Linien- und Reisebussen (Fallstudie 3, Szenarette).

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Anzahl neu zugelassener Fahrzeuge im Jahr 2050 im Referenzszenario, den Fallstudien 2 und 3 sowie der Szenarette differenziert nach konventionelles und alternatives Antriebskonzept. Die Neuzulassungszahlen basieren auf Berechnungen des TEMPS-Modells im Rahmen der Klimaschutzszenarien 2050 (Reppening et al. 2015).

Für das **Referenzszenario** wurde davon ausgegangen, dass die Anzahl und Zusammensetzung der Neuzulassungen dem Aktuelle Maßnahmen Szenario (AMS) der Klimaschutzszenarien entspricht.

In **Fallstudie 2** entspricht die Anzahl der Neuzulassungen der im AMS. Die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes wurden anhand des Klimaschutzszenarios KS 95 (Minderung der THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 95 %) abgeleitet, wobei berücksichtigt wurde, dass die zusätzliche Stromnachfrage durch die elektrischen Fahrleistungsanteile gedeckelt sind, so dass die zusätzliche Stromnachfrage der im KS 95 gegenüber dem AMS nicht übersteigt. Ansonsten würde ein übermäßiger Zubau an erneuerbaren Erzeugungsanlagen in Deutschland unterstellt. Daraus resultiert ein größerer Anteil an verbrennungsmotorischen Fahrzeugen in Fallstudie 2 im Vergleich zum Szenario KS 95.

Die Anzahl an Neuzulassungen in **Fallstudie 3** entspricht der im KS 95, hinsichtlich der Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes wurde hingegen auf das AMS zurückgegriffen.

Die **Szenarette** „Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung“ setzt sowohl bei der Anzahl der Neuzulassungen im Jahr 2050 als auch hinsichtlich der Anteile der jeweiligen Antriebskonzepte auf dem KS 95 auf.

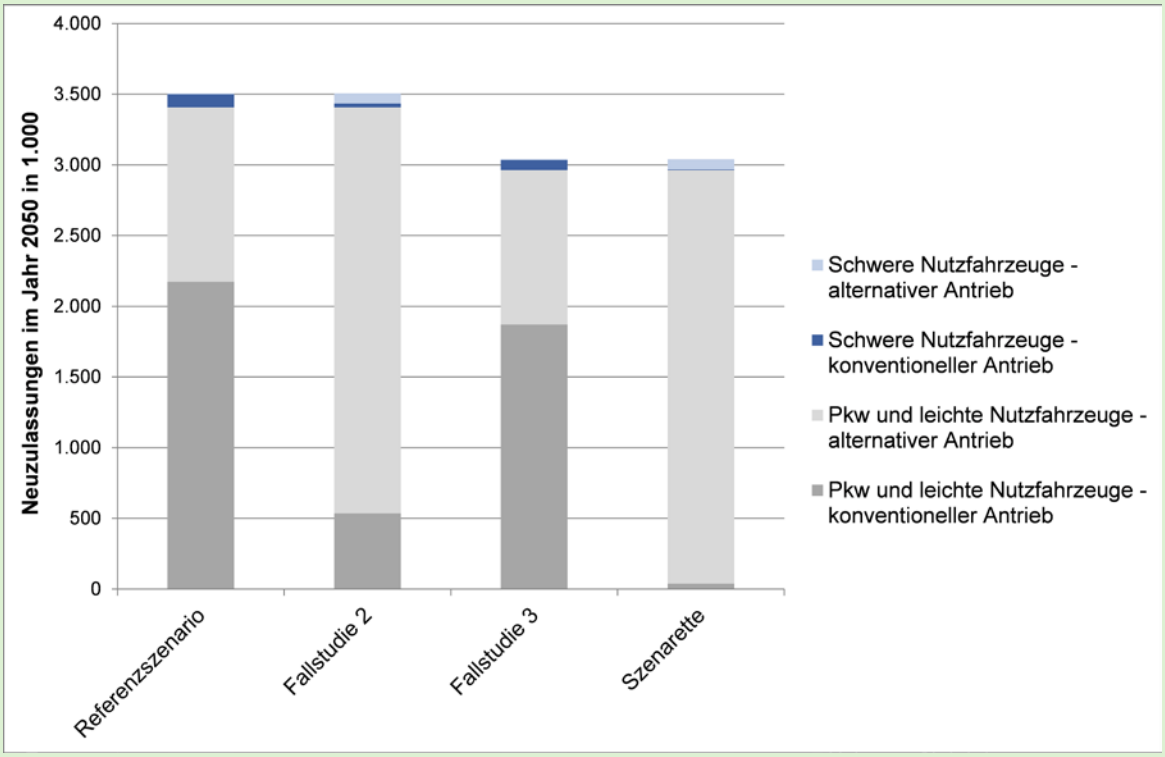
Im **Referenzszenario** werden im Jahr 2050 rund 3,4 Millionen Pkw und leichte Nutzfahrzeuge zugelassen, davon rund 1,2 Millionen (36 %) mit alternativen Antrieben. Bei den schweren Nutzfahrzeugen besitzen 7 % der rund 100.000 Neuzulassungen (7.000) einen alternativen Antrieb, wobei es sich bei 5.300 Fahrzeugen um Plug-In-Hybridfahrzeuge handelt, die lediglich über kleine Batteriespeicher verfügen, welche nur geringe elektrische Fahrleistungsanteile zulassen.

In der **Fallstudie 2** entspricht die Anzahl der Neuzulassungen dem Referenzszenario. Der Anteil an Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten ist jedoch deutlich höher und beträgt 84 % (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) bzw. 72 % (Lkw und Busse).

Mit rund 3 Millionen im Jahr 2050 neu zugelassenen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen liegt die Zahl der Neuzulassungen in **Fallstudie 3** 13 % unter dem Referenzszenario. Bei den schweren Nutzfahrzeugen sind es mit 76.000 23 % weniger zugelassene Fahrzeuge. Der Anteil alternativer Antriebe entspricht dem Referenzszenario.

In der **Szenarette** beträgt der Anteil alternativer Antriebskonzepte an den rund 3 Millionen neu zugelassenen Fahrzeugen (Pkw und leichte Nutzfahrtzeuge) im Jahr 2050 99 %. Bei den schweren Nutzfahrzeugen sind 95 % der 76.000 neu zugelassenen Fahrzeuge mit einem alternativen Antrieb ausgestattet.

Abbildung 76: Entwicklung der angenommenen Neuzulassungen in den Szenarien




Quelle: Difu/Öko-Institut.

In der nachfolgenden Tabelle werden die Abweichungen der Materialbedarfe der Neuzulassungen gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 abgeschätzt. Durch die neuen Antriebskonzepte ergeben sich Bedarfe an neuen Materialien, deren Verfügbarkeit ggf. kritisch bewertet werden kann. Auf der anderen Seite werden Fahrzeugkomponenten wie z. B. Verbrennungsmotoren und Getriebe nicht mehr benötigt, wodurch sich an dieser Stelle Einsparungen ergeben können. Die Materialzusammensetzung der (verbrennungsmotorischen) Fahrzeuge basiert auf Zimmer et al. (2009). Anhand spezifischer Materialmengen für die Komponenten Batterien (PHEV), Batterien BEV & REEV, Hybridmotoren und Elektromotoren für BEV, REEV und PHEV auf Basis von Subskrit[73] sowie Materialbedarfe durch Komponenten für Oberleitungshybrid-Lkw auf Basis von ENUBA 2[74] (Siemens 2016) wurden die Materialbedarfe für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben hergeleitet.

73 „Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen“ (Buchert et al. derzeit unveröffentlicht)

74 „Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen – Enuba 2“; Schlussbericht der Verbundfoschungspartner Siemens AG, TU Dresden und DLR (Siemens 2016)

Tabelle 12: Abweichung des Materialbedarfs der neu zugelassenen Fahrzeuge im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario

| Material | Fallstudie 2 t/a | Fallstudie 3 t/a | Szenarette t/a |
|---|---|---|---|
| Eisen/ Stahl | -264.810 | -519.444 | -798.778 |
| Aluminium | -505 | -89.966 | -90.344 |
| Kupfer | 116.555 | -13.572 | 111.861 |
| Titan | 174.078 | -6.774 | 177.381 |
| Andere Metalle | -300 | -2.838 | -3.137 |
| Platin | -2,8 | -17,0 | -19,8 |
| Palladium | 0,2 | -1,1 | -0,8 |
| Rhodium | 0,2 | -0,1 | 0,1 |
| Mangan | 139.891 | -5.444 | 142.545 |
| Lithium | 11.195 | -551 | 11.409 |
| Dysprosium | 330 | -32 | 338 |
| Gallium | 2,8 | -0,3 | 2,8 |
| Neodym | 1.238 | -120 | 1.266 |
| Praseodym | 330 | -32 | 338 |
| Terbium | 66 | -6,4 | 68 |
| Kunststoffe/ Gummi/ Textilien | -11.258 | -165.991 | -177.188 |
| Sonstige Materialien | 12.365 | -62.287 | -49.782 |

Quelle: Eigene Berechnung.

Während in **Fallstudie 2** der Bedarf an Stahl/Eisen im Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario um rund 265.000 t niedriger ausfällt, steigt der Bedarf einiger Metalle an. Der Bedarf an Lithium liegt mit rund 15.200 t fast auf 400 % über dem Referenzszenario. Dieser Bedarf entsprich fast der Hälfte der weltweiten Minenproduktion im Jahr 2015 (32.460 t in den wichtigsten Förderländern[75]). Weiterhin fällt die Zunahme des Bedarfs an Neodym (Nd), Gallium (Ga) und Dysprosium (Dy) auf das Zweieinhalbfache gegenüber dem Referenzszenario auf rund 2.100 t/a (Nd), 5 t/a (Ga) bzw. rund 550 t (Dy) auf. Diese zusätzlichen Bedarfe in Fallstudie 2 dürften neben den betrachteten Wirkungskategorien KRA, KEA und THG zu weiteren negativen Auswirkungen führen. So besitzt zum Beispiel Neodym ein hohes Versorgungsrisiko, da rund 95 % der Produktion im Förderland stattfindet (China) und die Recyclingrate unterhalb von 1 % liegt. Weiterhin ist die Förderung von Neodym in China mit einem hohen Risiko für Radioaktivität und Schwermetallen verbunden[76]. In der nachfolgenden Tabelle sind die mit den Materialienbedarfen der Fahrzeuge verbundene KRA, KEA und THG abgeschätzt. Da nicht für alle Materialien die entsprechenden Wirkungsfaktoren vorliegen, ist diese Tabelle jedoch unvollständig (Neodym, Praseodym, Terbium und nicht klar gekennzeichnete Materialien bleiben unberücksichtigt). An den aufgeführten Zahlen lässt sich jedoch zumindest die Größenordnung der Fahrzeugher-

75 Minenproduktion von Lithium nach den wichtigsten Ländern bis 2015, Statista, https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159929/umfrage/minenproduktion-von-lithium-nach-laendern/ abgerufen am 27.10.2016

76 Jahrestagung Rohstoffwende Deutschland 2049, https://www.oeko.de/uploads/oeko/aktuelles/Jahrestagung_2016/D2049_degreif.pdf

stellung im Vergleich zur Infrastruktur einschätzen. Bezogen auf die gesamten Ergebnisse aus Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur entspräche die Auswirkungen durch die Materialbedarfe rund 20 % (KRA), 44 % (KEA) und 43 % (THG) und damit sind die Abweichungen bei der Fahrzeugherstellung zwischen dem Fallbeispiel und dem Referenzszenario durchaus relevant. Der KRA durch den Materialbedarf der Fahrzeuge liegt in Fallstudie 2 z. B. 45 % über dem Referenzszenario, beim KEA sind es 31 % und bei den THG-Emissionen sind es 32 %.

Tabelle 13: KRA, KEA und THG-Emissionen durch Materialbedarfe neu zugelassener Fahrzeuge im Jahr 2050

| Wirkungskategorie | Einheit | Referenzszenario | Fallstudie 2 | Fallstudie 3 | Szenarette |
|---|---|---|---|---|---|
| **KRA** | **Mt/a** | 35 | 50 | 29 | 46 |
| **KEA** | **PJ/a** | 257 | 337 | 215 | 300 |
| **THG** | **$MtCO_2$äq/a** | 16 | 21 | 14 | 19 |

Quelle: Eigene Berechnung.

**Fallstudie 3** führt dagegen aufgrund der geringeren Anzahl an Neuzulassungen auch auf Seiten der Materialbedarfe für die Fahrzeugherstellung im Jahr 2050 zu Einsparungen in Hinblick auf KRA, KEA und THG-Emissionen. Da auch der Anteil an Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten gering ist liegt der Einsatz von kritischen Metallen und seltenen Erden leicht unter dem Referenzszenario.

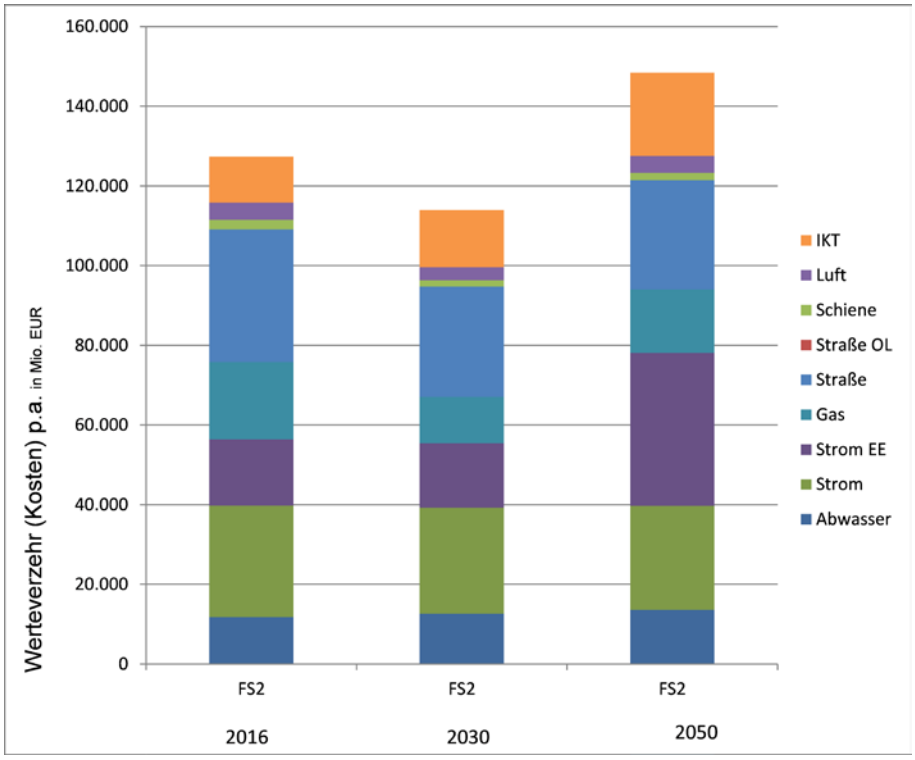
In der **Szenarette** gibt sich ein ähnliches Bild wie in Fallstudie 2, allerdings führt die geringere Anzahl an neu zugelassenen verbrennungsmotorischen Fahrzeugen zu weniger starken Anstieg von KRA, KEA und THG gegenüber dem Referenzszenario.

### Abschätzung der Kostenentwicklung in der Fallstudie

Insbesondere der in der Fallstudie angelegte erhebliche Ausbau der EE-Erzeugungsanlagen sowie der weitgehende Verzicht auf einen Rückzug aus der konventionellen Stromversorgung führen zu einer erkennbaren Steigerung der Kapitalkosten insgesamt (vgl. Abbildung 77). Diese Entwicklung geht mit ebenfalls steigenden Betriebskosten einher. Der vorgesehene Aufbau neuer Infrastrukturbestandteile (Straßenoberleitungen) ist in Bezug auf die Gesamtkosten noch vernachlässigbar.

Von besonderer Bedeutung sind in dieser Fallstudie die Kosten der für die Stromerzeugung eingesetzten Energieträger. Da die installierte Leistung fossiler Kraftwerke nicht zurückgeht, wirken sich Preissteigerungen bei den entsprechenden Energieträgern stärker aus als in den anderen Szenarien. Eine Schätzung wurde für diesen Kostenbestandteil nicht vorgenommen. Aufgrund der Endlichkeit der Rohstoffquellen ist jedoch von steigenden Preisen und damit auch steigenden Kosten der Energieerzeugung auszugehen.

Abbildung 77: Kapitalkosten in der Fallstudie 2 „Kopplung Verkehr – Energie“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.3.6 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie

Ergänzend zu der orientierenden Stoffstromanalyse und der Abschätzung der Kostenentwicklung wurde die Fallstudie einer Einschätzung ihrer Potenziale und Effekte auf die qualitativen Kriterien gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe von Bürgerinnen und Bürgern, Flexibilität, Reversibilität und Resilienz (vgl. Teil A Kapitel 3) unterzogen.

Für die Einschätzung der **gesellschaftlichen Akzeptanz** der Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr“ und der hierin angelegten Maßnahmen können u.a. folgende Argumente ins Feld geführt werden:

Zunächst bedingt die Fallstudie keine oder kaum Veränderungen für die Bürgerinnen und Bürger in ihrem Mobilitätsverhalten. Gegenüber dem Referenzszenario wird weder von einer Verkehrsverlagerung noch einer Verkehrsvermeidung ausgegangen, d. h. es finden weder soziale Innovationen in Hinblick auf die individuelle Mobilität noch eine Umstellung der Wirtschaftsweise (Güterverkehr) statt. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass in Abhängigkeit der Lebensstile der Bürger ein Akzeptanzproblem besteht, wenn gerade diese Innovationen im Rahmen einer „Verkehrswende“ gefordert werden. Dabei ist jedoch kein Unterschied zur gesellschaftlichen Akzeptanz zum Referenzszenario zu sehen, weshalb für die Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr“ tendenziell von einer hohen Akzeptanz ausgegangen werden kann.

Als förderlich für die Akzeptanz könnte sich die Erhöhung der Lebensqualität durch einen Rückgang an durch den Verkehr verursachten Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sowie der Lärmbelastung auswirken. Auch das Bewusstsein erneuerbare und klimafreundliche Energie anstatt fossiler Energieträger zu nutzen kann die Akzeptanz erhöhen.

Andererseits müssen sich Fahrzeugnutzer in ihrem Verhalten an die neuen technischen Konzepte anpassen. Insbesondere geringere Reichweiten und die Notwendigkeit einer besseren Planung für die Fahrzeugladung bei batterieelektrischen Fahrzeugen sowie längere Ladedauern und niedrigere

Höchstgeschwindigkeiten könnten die Akzeptanz bei Fahrzeugnutzern gegenüber dem Referenzszenario reduzieren.

Weiterhin erfordert diese Fallstudie einen verstärkten Ausbau von Erzeugungsanlagen für erneuerbaren Strom sowie von Übertragungsnetzen gegenüber dem Referenzszenario. Insbesondere bei direkt durch den Ausbau betroffenen Bürgern kann dies die Akzeptanz senken.

Gegenüber dem Referenzszenario sind in der Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr" leichte Abweichungen hinsichtlich der **Teilhabe** mit der Tendenz hin zu einer Erhöhung angesiedelt. Dies kann insbesondere auf der Seite der Energieerzeugung gesehen werden. Setzt sich der heutige Trend der Bürgerenergie-Modelle fort, durch den sich im Jahr 2012 rund 47 % der installierten Leistung zur Erzeugung erneuerbaren Stroms[77] in Händen von verschiedenen Bürgerenergie-Modellen befanden[78], ist in der Fallstudie durch die höheren installierten Leistungen von Erzeugungsanlagen eine leichte Tendenz zur Steigerung der Teilhabe angesiedelt. Durch die Nutzung von selbst erzeugtem Strom in eigenen batterieelektrischen Fahrzeugen oder die Veräußerung des Stroms können Bürger zunehmend als „Prosumer" bzw. „Producer" agieren. Durch die Option, die Ladung der Fahrzeugbatterien der Elektrofahrzeuge mittels Lademanagement (gesteuerte Ladung) zur Netzentlastung zu nutzen, können Bürger zunehmend an der technischen Integration ihrer privaten Infrastruktur ins Energiesystem profitieren. Dies erhöht die Teilhabe der Bürger.

Auf der anderen Seite bedarf es in dieser Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario einem verstärkten Ausbau von EE-Erzeugungsanlagen und Übertragungsnetzen. Eine intensivere Beteiligung der Bürger und Bürgerinnen an Planungsvorhaben kann dazu beitragen, die Akzeptanz für diesen notwendigen Ausbau zu erhöhen.

Für die Einschätzung der **Resilienz** (bzw. Vulnerabilität) der Fallstudie ist zwischen der globalen Versorgungssicherheit und der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland zu unterscheiden.

Durch die in dieser Fallstudie in Deutschland und Europa angesiedelte Produktion des erneuerbar erzeugten Stroms, der im Verkehrssektor verwendet wird und über stromgenerierte Kraftstoffe Verwendung findet, sollte sich die Importabhängigkeit von Energieträgern aus Krisenregionen verringern. Zudem kann dieser Strom grundsätzlich in einer Vielzahl von Staaten produziert werden, was die Abhängigkeit von einzelnen Exporteuren weiter reduziert. Für die Stromproduktion steht zudem eine große Bandbreite an Quellen und Anlagen zur Verfügung, was als positiv für die Resilienz bewertet werden kann. Für diese Fallstudie kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sich die Resilienz in Hinblick auf die Versorgungssicherheit gegenüber dem Referenzszenario, in welchem weiterhin fossile Energieträger in einem großen Maßstab importiert werden müssen, erhöht.

Für die Bewertung der Resilienz in der Fallstudie in Bezug auf die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland liegt der Fokus auf den neuartigen Infrastrukturkomponenten. Diese sind insbesondere die Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge sowie die Oberleitungsinfrastruktur der Oberleitungs-Lkw. Durch die dezentralere Infrastruktur (Ladepunkte) und das Oberleitungsnetz kann davon ausgegangen werden, dass die Energieversorgung des Straßenverkehrs anfälliger wird in Hinblick auf Extremwetterereignisse. Beschädigte Oberleitungen könnten im direkten Vergleich zu einem Straßennetz ohne diese Komponenten bei Störfällen wie z. B. umgestürzte Bäume durch einen Orkan zu einer aufwendigeren Instandsetzung führen, wodurch das Verkehrssystem länger gestört sein kann. Gleiches gilt für die Übertragungsnetze. Kommt es an diesen Infrastrukturkomponenten zu Störungen und damit zu Stromausfällen, beispielsweise durch Extremwetterereignisse, Überlast o. Ä. wirkt sich das direkt auf den Verkehrssektor aus. Damit ergibt sich für den Straßenverkehr eine neuartige Abhängig-

77 Ohne Pumpspeicherkraftwerk, Wind offshore und biogener Anteil des Abfalls.

78 Vgl. https://www.buendnis-buergerenergie.de/fileadmin/user_upload/downloads/Studien/Studie_Definition_und_Marktanalyse_von_Buergerenergie_in_Deutschland_BBEn.pdf

keit von einer intakten Stromversorgung. Bei Störfällen ist es zudem einfacher Flüssigkraftstoffe in betroffene Gebiete zu transportieren (z. B. in Tankwagen), um den Betrieb wieder herzustellen als Leitungen instand zu setzen oder neu zu installieren.[79] In Hinblick auf die Verkehrsinfrastruktur bzw. das Verkehrssystem kann demnach von einer geringeren Resilienz in dieser Fallstudie ausgegangen werden.

Zur Einschätzung der **Flexibilität** also der Anpassungsfähigkeit eines Systems an veränderte Rahmen- und Umweltbedingungen, die in der Fallstudie angelegt ist, lassen u.a. folgende Argumente benennen.

Durch die Investitionen in neuartige Infrastrukturkomponenten wie ein Oberleitungsnetz und Ladeinfrastruktur sowie den zusätzlichen Ausbau bestehender Komponenten wie Erzeugungsanlagen und Übertragungsnetze, die in dieser Fallstudie getätigt werden, besteht das Risiko sich in neue Pfadabhängigkeiten zu begeben. Sollte sich eine Nutzung der Infrastruktur nicht wie erhofft ergeben, z. B. aufgrund eines Wandels in der Wirtschaftsweise hin zu regionalen Stoffkreisläufen (abnehmender Verkehrsaufwand), könnte eine Abkehr und Fokussierung auf Alternativen, wie beispielsweise ein auf Wasserstoff basierendes Verkehrssystem, aufgrund der Sunk-costs[80] als schwierig gestalten. Die Flexibilität des Energieversorgungssystems des Verkehrs könnte dadurch abnehmen. Entsprechendes gilt für die Investition in zusätzliche Erzeugungsanlagen und Stromnetze.

Andererseits sind in dieser Fallstudie eine Reihe an Option zur erneuerbaren Erzeugung des Stroms bzw. der stromgenerierten Kraftstoffe angelegt. Bei veränderten Rahmenbedingungen würde sich ein Wechsel der Energiebereitstellung relativ einfach gestalten, ohne dass dies einen Einfluss auf die Nutzung der Fahrzeuge erforderlich machen würde. Die Möglichkeit, die fahrzeugeigenen Batteriespeicher als eine Flexibilitätsoption zur Netzstabilisierung einzusetzen, könnte die Flexibilität im Stromsystem ebenso erhöhen wie eine weitere Diversifizierung auf Seiten der Erzeugungsanlagen.

Aus Nutzerperspektive ist durch die Restriktionen bei der Nutzung der batterieelektrischen Fahrzeuge und der Notwendigkeit, den Einsatz und die Ladung vorausschauender zu planen von einer abnehmenden Flexibilität auszugehen.

Insgesamt wird die Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr“ nicht als wesentlich förderlich für die Flexibilität bewertet.

**Reversibilität** (Rückbaufähigkeit) ist grundsätzlich gegeben, allerdings werden weitere Infrastrukturen (insb. Energie) aufgebaut, die rückzubauen einen enormen Aufwand bedeutete.

Die Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ wird mit Blick auf Umweltfolgen auf nationaler Ebene als förderlich bewertet. Dies ist insbesondere begründet durch den Rückgang an Luftschadstoffemissionen und deren Folgen in der Fallstudie durch eine zunehmende Elektrifizierung des Verkehrssektors. Weiterhin werden die Folgen des Klimawandels durch eine Vermeidung von Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Referenzszenario verringert. Negativen Einfluss auf die Biodiversität können dagegen die zusätzliche Flächeninanspruchnahme (insbes. durch EE-Erzeugungsanlagen) hervorrufen.

International könnte die Fallstudie durch den zusätzlichen Bedarf an Rohstoffen, die heute aus Krisengebieten kommen (Konfliktmineralien) oder deren Gewinnung mit negativen Umweltfolgen verbunden ist. Ein Beispiel für das letztgenannte stellen radioaktive Belastungen der Förderregion durch vergesellschaftete radioaktive Nuklide bei der Förderung von Neodym aus seltenen Erden dar. Diese negativen Effekte müssten jedoch auch im Referenzszenario mit geeigneten Maßnahmen wie bspw. Zer-

79 Eine Rückfallebene wäre hier das Abschleppen der Oberleitungs-Lkw durch Diesel- oder batteriebetriebene Lkw.

80 irreversible Kosten

tifizierungssystemen oder Anforderungen an das Abfallmanagement an den Produktionsstandorten adressiert werden[81].

## 2.4 Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“

### 2.4.1 Das Szenario im Jahr 2050

Langfristprognosen wie die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 gehen bis zum Jahr 2030 sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr von einem zunehmenden Transportaufwand aus. Mit einer Steigerung um rund 90 Mrd. Pkm auf 992 Mrd. Pkm (+10 %) wird die stärkste absolute Zunahme in der Prognose zum Personenverkehr beim motorisierten Individualverkehr gesehen. Die Transportleistung im Straßengüterverkehr steigt der Verkehrsverflechtungsprognose zufolge um rund 170 Mrd. tkm auf 607 Mrd. tkm (+39 %), die im Schienengüterverkehr um rund 46 Mrd. tkm (+43 %) auf 154 Mrd. tkm. Im Güterverkehr wird in Szenarien auch von einem nach 2030 andauernden Wachstum ausgegangen.

Während die in Teil C Kapitel 2.3.1 beschriebene Fallstudie „Kopplungen Energie – Verkehr“ auf die Frage fokussiert, wie diese steigende Verkehrsleistung energieeffizient und möglichst strombasiert erbracht werden kann, werden in diesem Kapitel strategische Ansatzpunkte in Hinblick auf „Innovationen im Verkehrsbereich“ gebündelt, die Optionen eröffnen, die Verkehrsinfrastruktur durch Verkehrsverlagerung, Verkehrsvermeidung und optimierte Betriebsführung zu entlasten.

Als ein wesentlicher Treiber wurden die rasante Entwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologie und die Möglichkeit, zu jeder Zeit vernetzt Informationen auszutauschen, identifiziert. Damit können Potenziale sowohl in der Verkehrsorganisation als auch bei der Gestaltung individueller Mobilität eröffnet werden.

Der zunehmende Grad an Vernetzung von Informationen im Verkehrsbereich kann einen komfortableren Zugang zu multi- und intermodaler Mobilität im Personenverkehr ermöglichen [Stra 3 und Sch 6].[82] Dadurch kann eine Verlagerung auf öffentliche Verkehrsträger ermöglicht werden, welche mit einer höheren Energieeffizienz einhergeht. Eine erfolgreiche Verlagerung auf die Schiene [Sch 1] erfordert eine Verbesserung des Instandhaltungszustandes der Infrastrukturen [Str 5 und Sch 5], einen Ausbau der Schieneninfrastruktur zur Beseitigung von Engpässen sowie die Schaffung von Anreizen [Stra 7]. Der Zugang zum Schienenverkehr kann über kurze Wege zu Fuß oder per Fahrrad, per Pedelec oder Elektrofahrrad und bei größeren Entfernungen mit Carsharing-Fahrzeugen ermöglicht werden. Eine weitere Folge des zunehmenden Vernetzungsgrades der Verkehrsteilnehmer kann in einer, durch neue Mobilitätslösungen in Form von Mitfahr-Apps, ermöglichten Erhöhung der Fahrzeugauslastung darstellen. Dadurch kann das Wachstum der Fahrleistung im MIV geringer als das des Verkehrsaufwandes ausfallen.

Der Einsatz von autonom fahrenden Fahrzeugen ist derzeit in der technischen Entwicklung und wird durch die zunehmende Vernetzung der Fahrzeuge und Ausstattung mit Rechenkapazitäten und Sensorik ermöglicht. Die konkreten Auswirkungen des autonomen Fahrens sind derzeit noch nicht umfassend untersucht. Erste Überlegungen deuten jedoch darauf hin, dass autonom fahrenden Fahrzeuge ein hohes Potenzial für das Carsharing besitzen, da ein komfortablerer Zugang gesehen wird [Sch 2].[83] Auf der anderen Seite besteht das Risiko, dass der Einsatz solcher Fahrzeuge zusätzlichen Verkehr induziert, beispielsweise wenn für die Nutzung keine Fahrerlaubnis oder -tüchtigkeit erforderlich ist.

81 Beispiele für Instrumente für Neodym: siehe Policy Paper 2: Deutschland 2049 – Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft, http://www.oeko.de/oekodoc/2600/2016-607-de.pdf

82 Die folgenden Codierungen verweisen auf die entsprechenden, an den jeweiligen Stellen relevanten strategischen Ansatzpunkte, wie sie in Teil B Kapitel 3 eingeführt sind.

83 http://www.heise.de/newsticker/meldung/Autonome-Autos-machen-Privat-Pkw-ueberfluessig-1943508.html

Zudem können durch Bereitstellungsfahrten (Leerfahrten) solcher Fahrzeuge weitere Verkehre verursacht werden.

Der Einsatz autonomer Fahrzeuge kann einen direkten Einfluss auf die Straßenverkehrsinfrastruktur besitzen. So kann bspw. von einer deutlichen Erhöhung der Kapazität der Streckenabschnitte von Autobahnen ausgegangen werden. Bei gemischtem Verkehr (Pkw und Lkw) kann die Kapazität eines Fahrstreifens bei Autobahnen mit zunehmendem Anteil autonomer Fahrzeuge um bis zu 80 % steigen. Neben der Kapazität kann auch die Stabilität verbessert werden, wodurch ein Kapazitätsabfall (capacity drop) vermieden werden kann. Auch im innerstädtischen Raum ist von einer Kapazitätserhöhung auszugehen, welche dort überwiegend durch die Knotenpunkte (Lichtzeichenanlagen) bestimmt wird. Die Kapazitäten an diesen Knotenpunkten könnten sich durch autonome Fahrzeuge um 40 % erhöhen (Friedrich 2015). Damit eröffnet sich ein Potenzial, auf Netzausbau zu verzichten bzw. Straßen einer anderen Nutzung zuzuführen bzw. zurückzubauen.

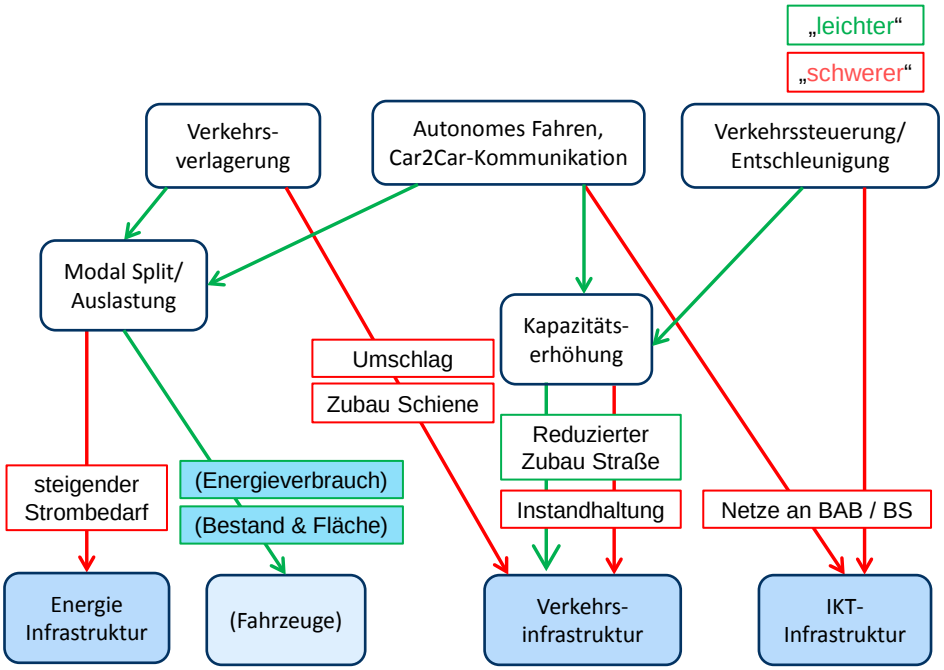
Die bestehenden Straßenverkehrsinfrastrukturen werden schon heute insbesondere innerorts multifunktional genutzt (MIV, ÖPNV, Fahrrad oder verkehrsfremde Nutzungen), die beschriebenen Veränderungen im Mobilitätsverhalten und neuen Technologieoptionen erfordern keine aufwändigen Anpassungen der Infrastruktur [Stra 1]. Sowohl durch diese neuen Mobilitätsoptionen als auch einen gesellschaftlichen Wertewandel kann der Besitz eines eigenen Fahrzeuges an Attraktivität verlieren. Somit kann der gesamte Fahrzeugbestand verringert werden [Stra 6]. Induziert durch einen geringeren Fahrzeugbestand kann eine Umwidmung der Stellflächen des Straßenverkehrs für andere Nutzungen erfolgen.

Ein wesentlicher strategischer Ansatzpunkt für einen ressourcenleichten Güterverkehr ist die Verlagerung von der Straße auf die Schiene. Im Weißbuch Verkehr ist als Ziel eine Verlagerung von 50 % der Transporte über 300 km bis 2050 formuliert (KOM 2011). Auch hier können die Vorteile der digitalen Vernetzung Potenziale aufweisen. So eröffnet beispielsweise der Einsatz von neuen Telematiksystemen Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugdichte auf stark befahrenden Trassen zur Beseitigung von Engstellen. Insbesondere an intermodalen Umschlagpunkten wie Güterzentren und Häfen lassen sich dadurch mehr Güter auf die Schiene bringen und auch der Anspruch an „Just-in-time"-Transporte besser erfüllen. Zudem kann damit der Anteil an Leerfahrten reduziert werden (UBA 2010a). Die Nutzung des Schienenverkehrs sowie der Binnenschifffahrt kann einen Zuwachs erfahren, indem höhere Kraftstoffpreise im Straßenverkehr und Energieeffizienz die Wirtschaftlichkeit verbessern [BSch 1]. Eine Voraussetzung ist der Ausbau der Infrastruktur für den Hinterlandverkehr. Weiterhin erfordert es eine integrierte Betrachtung unter Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels auf die Verkehrsinfrastruktur (BSch 3, 4). Eine effektivere Nutzung der Infrastruktur kann durch die Kommunikation auf Fahrzeugebene und autonomes oder teilautonomes Fahren und Platooning erreicht werden [Stra 6].

Des Weiteren kann durch eine stärkere Vernetzung der Verkehrsträger und verkehrsträgerübergreifende Planung und Koordination die Vulnerabilität des Gesamtsystems vermindert werden [Stra 4 und Sch 3, 8].

Maßnahmen wie die Abschaffung der Befreiung der Energiesteuer im Luftverkehr und indirekter Subventionen können die Verkehrsmittelwahl hin zu ressourcenleichteren Verkehrsträgern beeinflussen [Lu 5, 9].

Abbildung 78: Wirkungsgefüge „Innovationen im Verkehrsbereich“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Das Strategiepaket zielt auf folgende der eingangs genannten Stellschrauben für Ressourcenleichtigkeit ab:

- Reduktion des Bestands an bzw. Verzicht auf Neubau von technischen Infrastrukturen
- Erhöhung der Nutzungsintensität (z. B. Kapazität von verkehrstragenden Infrastrukturen erhöhen, Auslastung der Fahrzeuge erhöhen)
- Multifunktionale Nutzungen (z. B. Begegnungszonen mit hohem Anteil verkehrsfremder Funktion)

Daneben können sich durch die aufgeführten Ansatzpunkte eine Reduzierung des Endenergieverbrauchs durch Verkehrsverlagerung und -vermeidung sowie Auslastungserhöhungen ergeben. Zudem zielt das Strategiepaket auf eine Reduktion der Materialinanspruchnahme im Bestand und eine Reduktion der Flächeninanspruchnahme durch die Infrastrukturen im Verkehr ab. Grundvoraussetzung ist eine integrierte Verkehrsplanung, die verkehrsträgerübergreifend auf den unterschiedlichen Verwaltungsebenen zusammenspielt.

Das Strategiepaket „Innovationen im Verkehrsbereich“ lässt sich in folgendem Bild der Verkehrsabwicklung im Jahr 2050 resümieren:
Durch neue digitale Lösungen sind die Verkehrsträger optimal miteinander verknüpft. Multimodale Mobilität gehört zum Alltag und Verkehre wurden von der Straße auf die Schiene verlagert.
Flexible Mobilitätslösungen und autonome Fahrzeuge prägen den Alltag im Straßenverkehr.
Der Ausbau der Infrastruktur im Straßenverkehr konnte reduziert werden, da die Kapazität durch digitale Lösungen (z. B. Verkehrssteuerung) und Entschleunigung erhöht werden konnte.

### 2.4.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen

Zur Übersichtlichkeit wurde die Fülle der Optionen bzw. Maßnahmen, die in dieser Fallstudie beispielhaft zur Implementation kommen, verschiedenen Bereichen und Dimensionen von Infrastruktursystemen zugeordnet:

- Intelligente Straßensysteme und zielgerichtete Verkehrssteuerung führen zur Verbesserung des Verkehrsflusses und erhöhen die Kapazität der bestehenden Infrastrukturen. Somit wird der Ausbau der Infrastrukturen vermieden.
- Gleichwohl führt eine Entschleunigung des (Straßen-)Verkehrs zu Kapazitätserhöhung durch harmonischeren Verkehrsfluss.
- Durch autonomes und teilautonomes Fahren wird ebenso die Kapazität der bestehenden Infrastrukturen erhöht. Weiterhin werden die Fahrzeuge effizienter gefahren. Autonomes Fahren bietet ebenso intermodalen Verkehrskonzepten wie dem Carsharing Wachstumspotenziale.
- Flexible Mobilitätsangebote fördern die effizientere Nutzung der Fahrzeuge, was zu einer Auslastungserhöhung führt und somit den Ressourcenverbrauch senkt.
- Stärkung des intermodalen Verkehrs im Personen- als auch Güterverkehr und somit Verlagerung des Verkehrs auf ressourceneffiziente Verkehrsträger.
- Veränderung des Modal-Splits im Personenverkehr hin zum öffentlichen Verkehr und dem Fahrradverkehr durch Anreizsysteme.

### 2.4.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie

Nicht alle der zuvor genannten Optionen und Maßnahmen können für die Berechnungen im Rahmen der orientierenden Stoffstromanalyse mit Daten unterlegt und operationalisiert werden. Für einzelne Maßnahmen kann die Wirkung auf Ressourcenleichtigkeit nicht quantifiziert bzw. allenfalls in empirischen Studien fallweise bestimmt werden. Vor dem Hintergrund der hohen Aggregationsebene der Analysen im Rahmen des Vorhabens RELIS wurden aus den o. g. Optionen und Maßnahmen folgende Annahmen zur Entwicklung der Infrastrukturbestände abgeleitet:

- Durch eine drastische Reduktion der benötigten Parkfläche können bis 2050 vier Prozent der Straßenflächen von **Gemeindestraßen** gegenüber der Referenzentwicklung eingespart werden. Proportional entwickeln sich auch die zuständigen **Straßenmeistereien** und **fahrbahnbegleitende Infrastrukturen** (Schutzplanken, Leuchten usw.).
- Der starke Zuwachs der Verkehrsleistung auf der Schiene in dem Szenario setzt einen entsprechenden Infrastrukturausbau aus. Ein Zielnetz und der nötige Ausbaubedarf werden den ambitionierten Szenarien aus Holzhey (2010, 2012) entnommen. So steigt die **Gleisnetzlänge** bis 2050 um 3 % gegenüber der Referenz. Anlagen zur **Energieversorgung** und der **Signal- und Kommunikationstechnik** werden als proportional zur Gleislänge entwickelnd angenommen.
- Es wird davon ausgegangen, dass noch 2030 keine neuen Flächen und Infrastrukturen für die **Luftverkehre** erschlossen werden. Damit ergibt sich eine Bestandsminderung im Vergleich zur Referenzentwicklung von 15 %.
- Durch den steigenden Bedarf an digitaler Kommunikation wird ein im Vergleich zur Referenz verstärkter Ausbau der **Server- und Rechenkapazitäten** sowie des **mobilen Datennetzwerkes** ausgegangen.

### 2.4.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

Grundsätzlich setzt die Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ an der Vermeidung und Verlagerung von Verkehren, Kapazitätserhöhung der gegebenen Infrastruktur und verringertem Netzausbau (Straßenverkehr) an. Dabei kommen häufig digitale Lösungen zur Anwendung (vgl. Kap. 2.4.1). Neben den Veränderungen im Straßennetz weist die Fallstudie Abweichungen gegenüber dem Referenzszenario auf

Seite des Schienennetzes sowie der IKT-Infrastruktur auf (Netzerweiterung).Dies kommt in den folgenden Abbildungen zum Ausdruck.

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ sind in den folgenden Tabellen und Grafiken abgebildet. Dabei wird nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 differenziert. Der Energiesektor und die Siedlungswasserwirtschaft weisen in der Fallstudie keine Abweichung zum Referenzszenario auf.

Tabelle 14: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau- und Unterhalt | Verkehr | 101 | 107 | 104 | 270 | 284 | 268 | 11 | 11 | 11 |
| | IKT | 9 | 12 | 15 | 5 | 8 | 11 | 0 | 0 | 1 |
| | Wasser/Abwasser | 42 | 46 | 47 | 27 | 29 | 30 | 2 | 2 | 2 |
| | Energie | 43 | 51 | 55 | 89 | 124 | 133 | 6 | 8 | 9 |
| | ***Zwischensumme*** | **196** | **215** | **222** | **391** | **445** | **441** | **19** | **22** | **23** |
| Bau-aufwendungen | Verkehr | 4,2 | 3,2 | 2,1 | 54,5 | 45,4 | 28,8 | 5,5 | 4,2 | 2,5 |
| | IKT | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,35 | 0,54 | 0,77 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| | Wasser/Abwasser | 0,14 | 0,12 | 0,09 | 1,95 | 1,83 | 1,35 | 0,19 | 0,16 | 0,11 |
| | Energie | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,91 | 0,70 | 0,59 | 0,08 | 0,06 | 0,04 |
| | ***Zwischensumme*** | **4,4** | **3,3** | **2,3** | **57,7** | **48,5** | **31,5** | **5,8** | **4,5** | **2,7** |
| Betrieb | Verkehr | 1,7 | 1,3 | 0,9 | 22,1 | 19,3 | 12,6 | 2,2 | 1,8 | 1,1 |
| | IKT | 5,4 | 8,1 | 9,0 | 69,2 | 115,1 | 119,1 | 7,1 | 10,9 | 10,6 |
| | Wasser/Abwasser | 3,1 | 1,9 | 1,2 | 39,8 | 27,3 | 15,8 | 4,1 | 2,6 | 1,4 |
| | Energie | 22,4 | 15,6 | 10,0 | 262,9 | 201,0 | 127,1 | 30,0 | 21,4 | 12,7 |
| | ***Zwischensumme*** | **33** | **27** | **21** | **394** | **363** | **275** | **43** | **37** | **26** |
| ***Summe*** | | **233** | **246** | **245** | **843** | **856** | **748** | **68** | **63** | **51** |
| Nutzung[1)] | Kraftwerke (fossil) | 243 | 170 | 106 | 3.112 | 2.410 | 1.414 | 341 | 248 | 137 |

[1)] **Hinweis:** Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 15: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Sektor | Versiegelte Fläche in 1.000 ha | | |
|---|---|---|---|
| | 2012 | 2030 | 2050 |
| Verkehr | 479 | 501 | 499 |
| IKT | 0 | 0 | 0 |
| Wasser/Abwasser | 14 | 14 | 13 |
| Energie | 10 | 9 | 8 |
| ***Summe*** | **502** | **524** | **521** |
| | **Abweichung gegenüber dem Referenzszenario in 1.000 ha** | | |
| Verkehr | 0 | -3 | -13 |
| IKT | 0 | 0,03 | 0,06 |
| Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 |
| Energie | 0 | 0 | 0 |
| **Insgesamt** | **0** | **-3** | **-13** |

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 16: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA Abweichung ggü. dem Referenzszenario in % | | | KEA Abweichung ggü. dem Referenzszenario in % | | | THG Abweichung ggü. dem Referenzszenario in % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau und Unterhalt | Verkehr | 0 | 0 | -5 | 0 | -1 | -22 | 0 | 0 | -1 |
| | IKT | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Energie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ***Zwischensumme*** | **0** | **0** | **-4** | **0** | **0** | **-20** | **0** | **0** | **-1** |
| Bau-aufwendungen | Verkehr | 0 | 0 | -0,02 | 0 | 0,0 | -0,4 | 0 | 0,00 | -0,03 |
| | IKT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Energie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ***Zwischensumme*** | **0** | **0** | **-0,02** | **0** | **0,0** | **-0,4** | **0** | **0,0** | **0,0** |
| Betrieb | Verkehr | 0 | 0,0 | -0,1 | 0 | -0,1 | -0,9 | 0 | 0,0 | -0,1 |
| | IKT | 0 | 1,2 | 1,7 | 0 | 16,3 | 23,0 | 0 | 1,5 | 2,0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Energie | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | ***Zwischensumme*** | **0** | **1** | **2** | **0** | **16** | **22** | **0** | **2** | **2** |
| ***Summe*** | | **0** | **1** | **-3** | **0** | **16** | **1** | **0** | **2** | **1** |
| *Nutzung[1)]* | *Kraftwerke (fossil)* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |

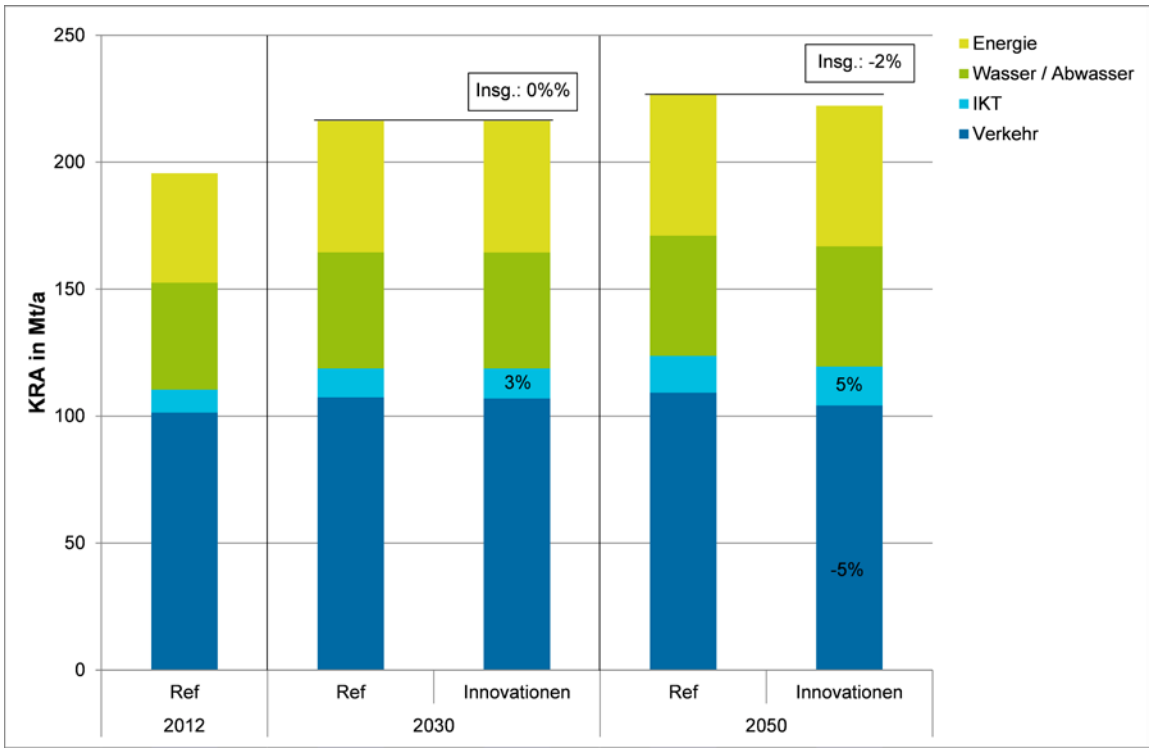
[1)] **Hinweis***:* Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Eigene Berechnung.

Zur besseren Darstellung werden im Weiteren nicht die absoluten Beträge in den einzelnen Infrastrukturbereichen ausgewiesen, sondern lediglich die Differenz gegenüber dem Referenzszenario.

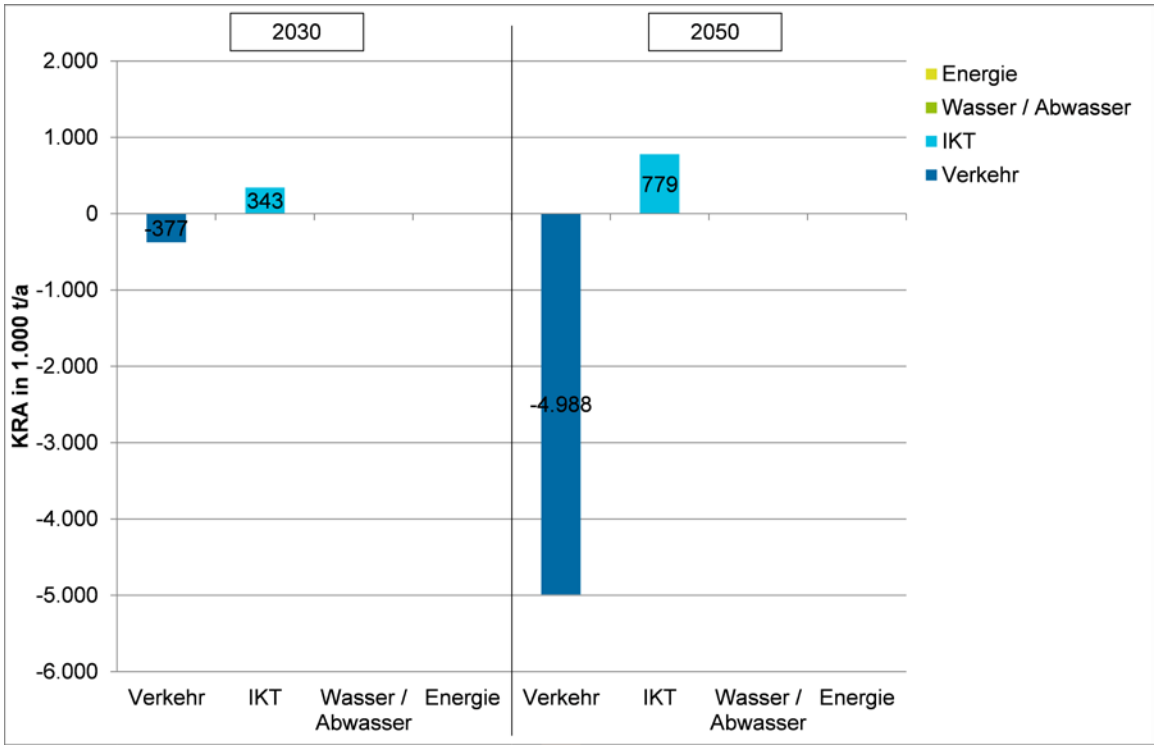
Der **KRA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur nimmt in dieser Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 insgesamt leicht ab (-2 %), da er sich im Verkehrssektor zwar um 5 % verringert, im IKT-Sektor jedoch um 5 % ansteigt. Dabei stehen 5 Mio. t/a eingesparten KRA im Verkehrssektor 0,8 Mio. t/a zusätzlich Bedarf im IKT-Sektor für das Jahr 2050 gegenüber dem Referenzszenario gegenüber (vgl. Abbildung 79 und Abbildung 80).

Abbildung 79: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

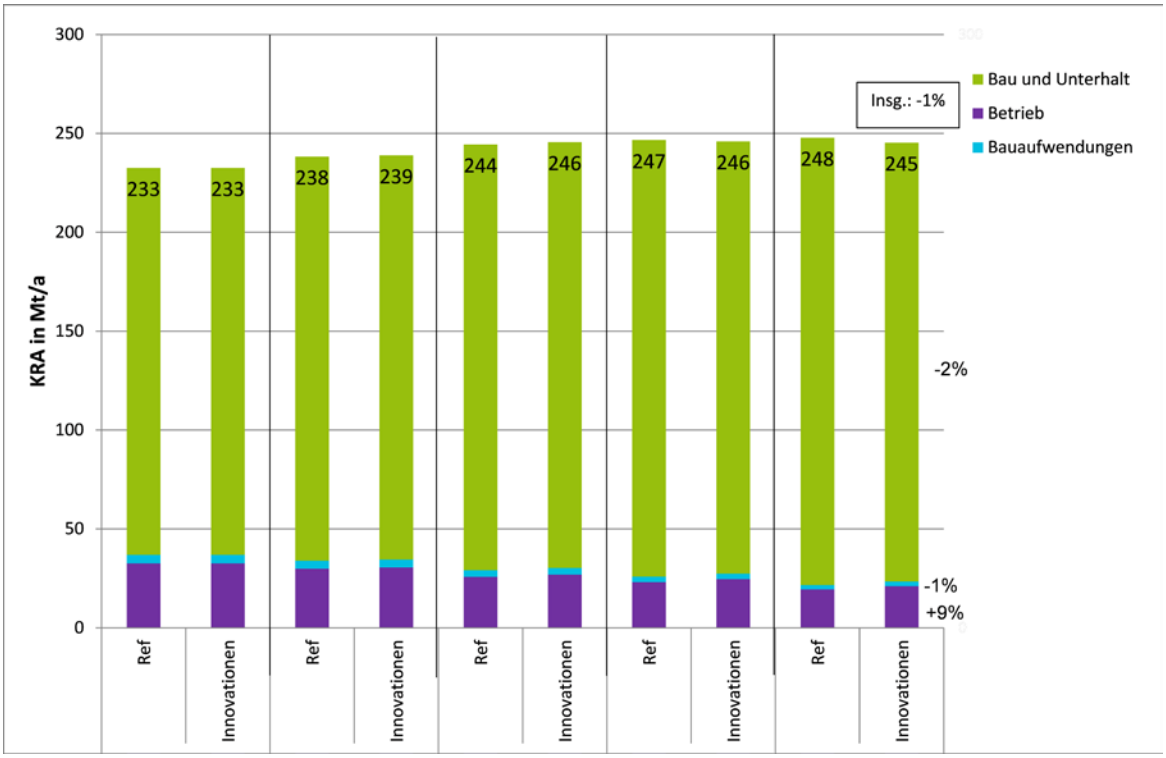
Abbildung 80: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr"; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Der zusätzliche Bestand an IKT Infrastruktur führt jedoch zu einem im Vergleich zum Referenzszenario höherem KRA durch den Betrieb der Infrastruktur. Dieser liegt in der Fallstudie mit 21 Mt/a im Jahr 2050 rund 1,7 Mt/a (9 %) über dem Referenzszenario. Auf Seiten der Bauaufwendungen verringert sich aufgrund des geringeren Bestandes an Verkehrsinfrastruktur der KRA im Vergleich zum Referenzszenario (22.000 t/a bzw. -1 %). Insgesamt liegt der KRA in de Fallstudie im Jahr 2050 in der Fallstudie Innovationen im Verkehr damit nur 1 % bzw. 3 Mt/a unter dem Referenzszenario (vgl. Abbildung 81). Keine Änderungen ergeben sich in dieser Fallstudie hinsichtlich der als Nutzung bezeichneten Nettostromerzeugung (fossile Erzeugungsanlagen). Auf Seiten der Fahrzeugnutzung und der Fahrzeugproduktion ergeben sich in dieser Fallstudie deutliche Änderungen gegenüber dem Referenzszenario, welche sich jedoch außerhalb der definierten Systemgrenzen befinden. Zur Einordnung der Effekte des im Vergleich zum Referenzszenario geringeren Fahrzeugbestandes (Teil C Kapitel 2.3.5) und der Reduktion des Endenergiebedarfes (Teil C Kapitel 2.4.4) werden diese Bereiche in zwei Exkursen betrachtet. Durch die geringere Anzahl an Neuzulassungen im Straßenverkehr im Jahr 2050 ergibt sich in Hinblick auf den KRA eine Reduktion bei dem mit den der Fahrzeuge verbundenen KRA um 6 Mt/a.

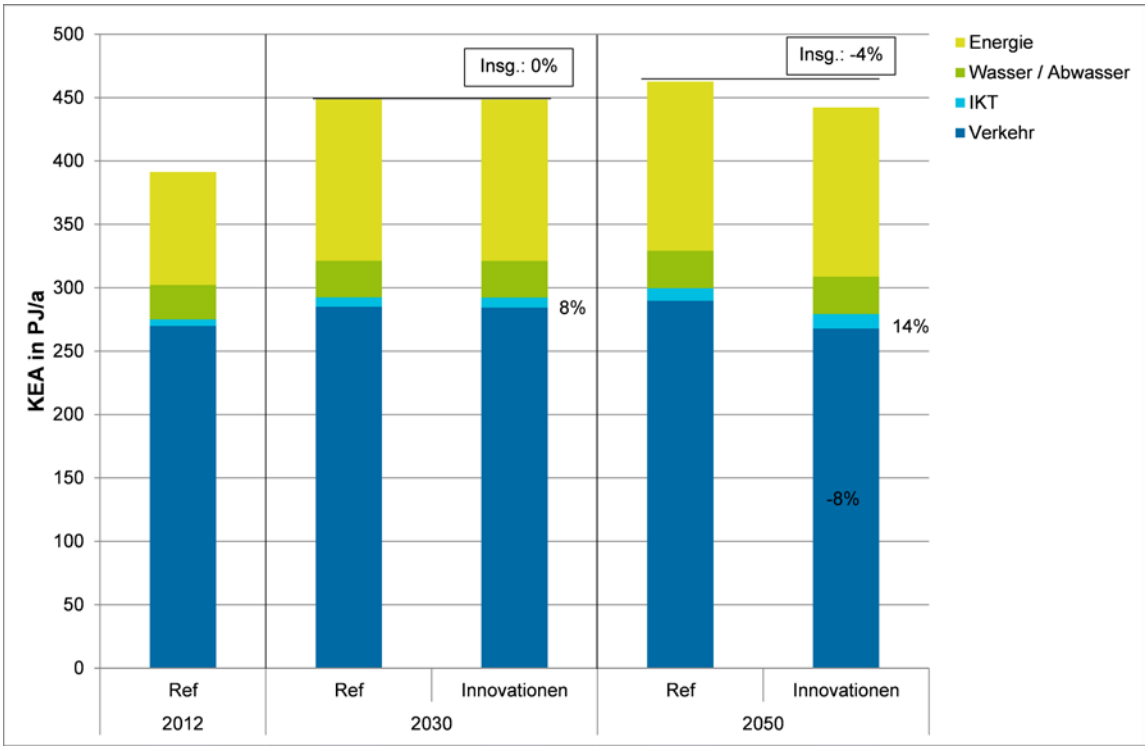
Abbildung 81: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

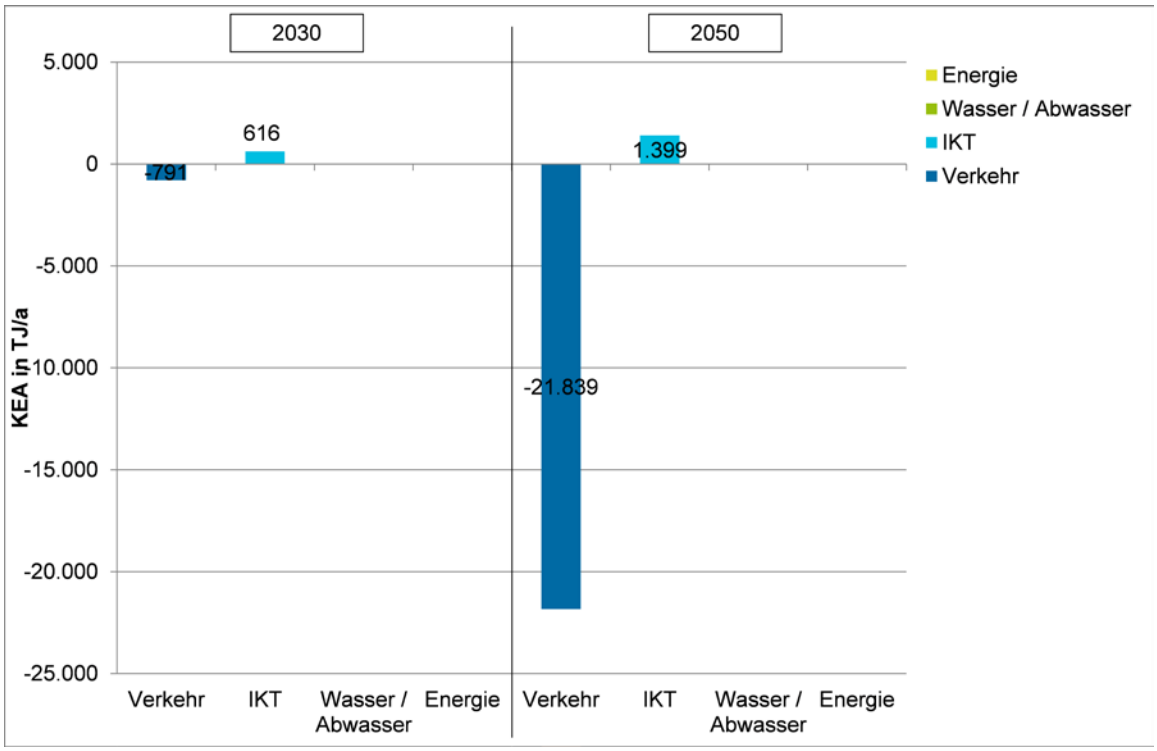
Der **KEA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur liegt im Jahr 2050 rund 4 % unter dem Referenzszenario. Beim KEA steht einer Steigerung bei der IKT von 14 % (+1,4 PJ/a) ein Rückgang im Verkehrssektor von 8 % bzw. 21,8 PJ gegenüber (vgl. Abbildung 82 und Abbildung 83).

Abbildung 82: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

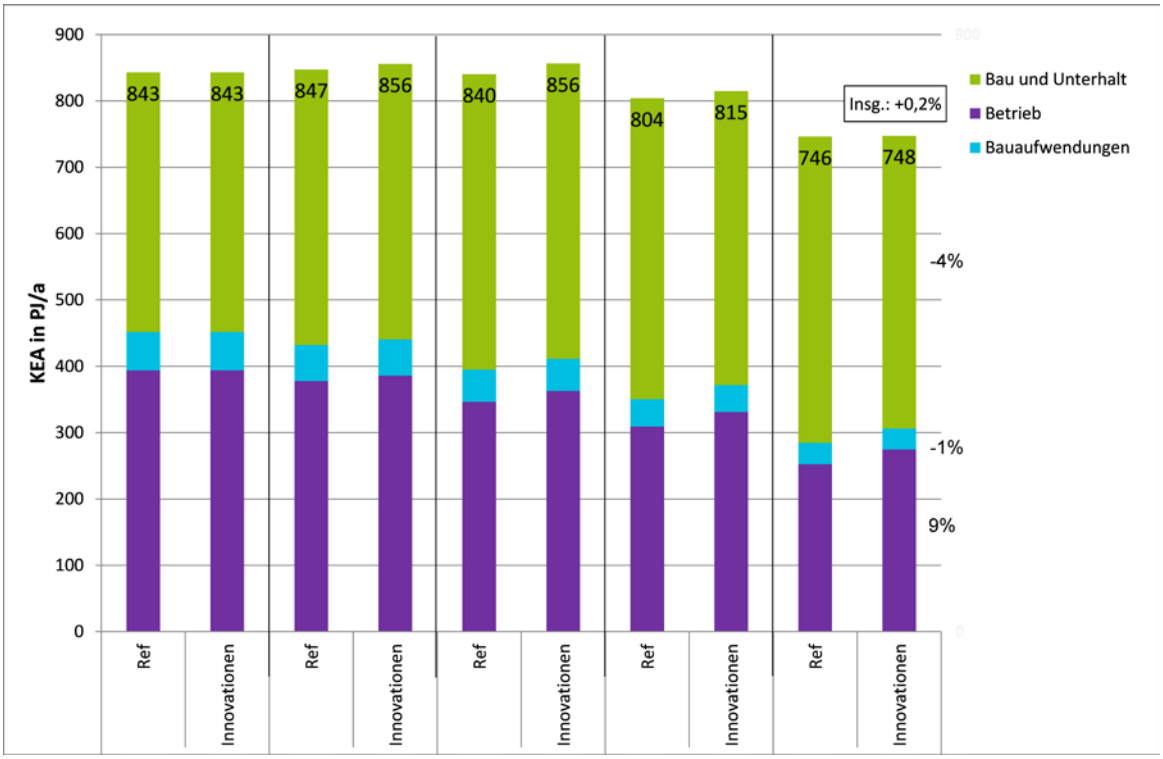
Abbildung 83: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Unter Einbezug der Bauaufwendungen und des Betriebes der Infrastruktur ergibt sich insgesamt kaum eine Veränderung des KEA im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzszenario. Der KEA liegt in der Fallstudie um 0,2 % bzw. 1,3 PJ/a über dem Referenzszenario. Die Einsparungen bei Bau und Unterhalt der Infrastruktur (-4 %) und bei den Bauaufwendungen (-1 % bzw. 0,4 PJ/a) werden durch den zusätzlichen Stromverbrauch der IKT-Infrastruktur mehr als überkompensiert. Insgesamt liegt der KEA durch den Betrieb der Infrastruktur im Jahr 2050 rund 22 PJ/a (+9 %) über dem Referenzszenario. Allerdings ergeben sich auf Seite der Fahrzeugnutzung in der Fallstudie deutliche Potenziale, welche nicht in der Abbildung dargestellt sind. Der Exkurs in Teil C Kapitel 2.4.4 zeigt die Veränderung des Endenergiebedarfes des Fahrzeugbetriebes gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 auf. In der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ liegt dieser rund 270 PJ/a (-18 %) unter dem Referenzszenario.

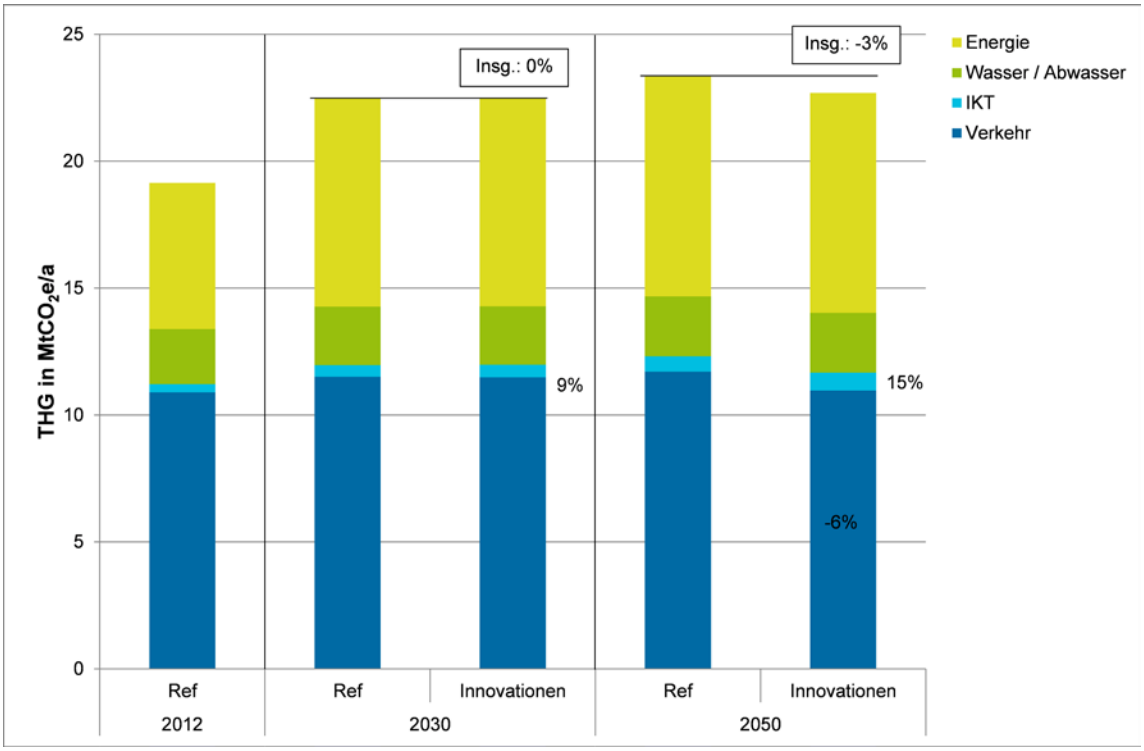
Abbildung 84: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

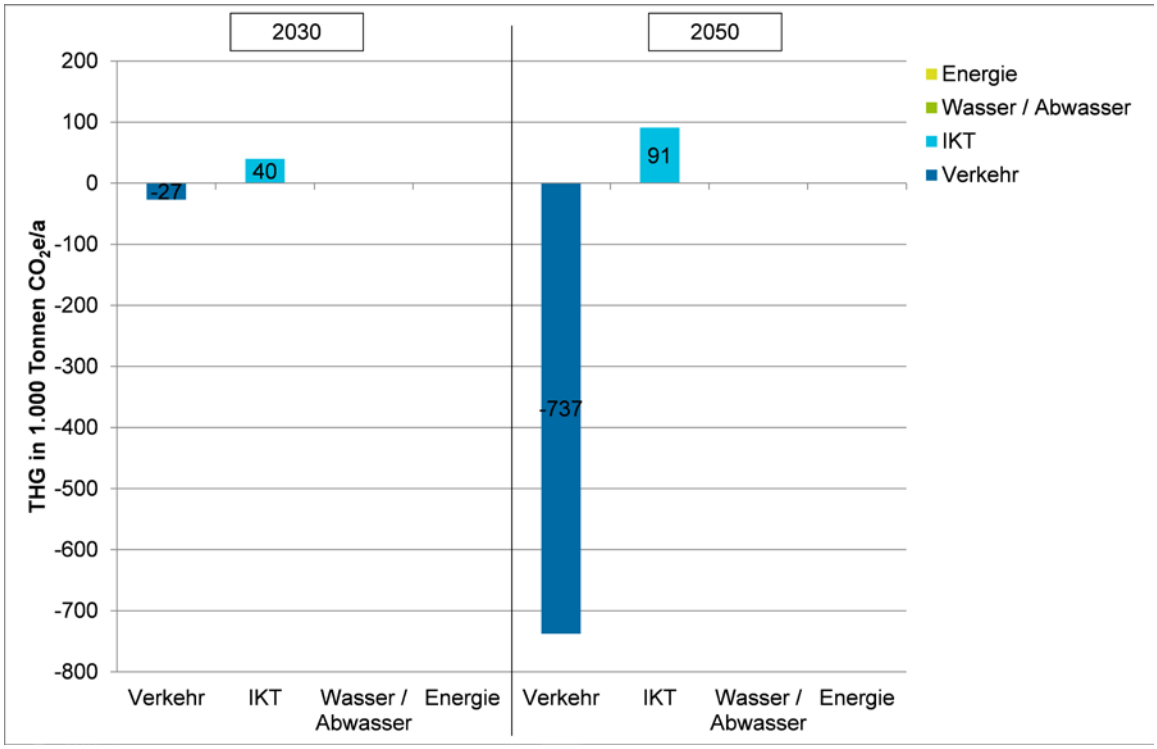
Die **THG**-Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur liegen im Jahr 2050 in dieser Fallstudie rund 3 % unter dem Referenzszenario. Einem Anstieg der Emissionen im IKT-Sektor von 15 % steht eine Reduktion im Vergleich zum Referenzszenario im Verkehrssektor von 6 % gegenüber. Dabei stehen rund 0,74 Mio. t $CO_2$ äq/a an Einsparungen (Verkehrssektor) 91.000 t $CO_2$ äq/a zusätzlichen Ausstoß (IKT) entgegen (vgl. Abbildung 85 und Abbildung 86).

Abbildung 85: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050



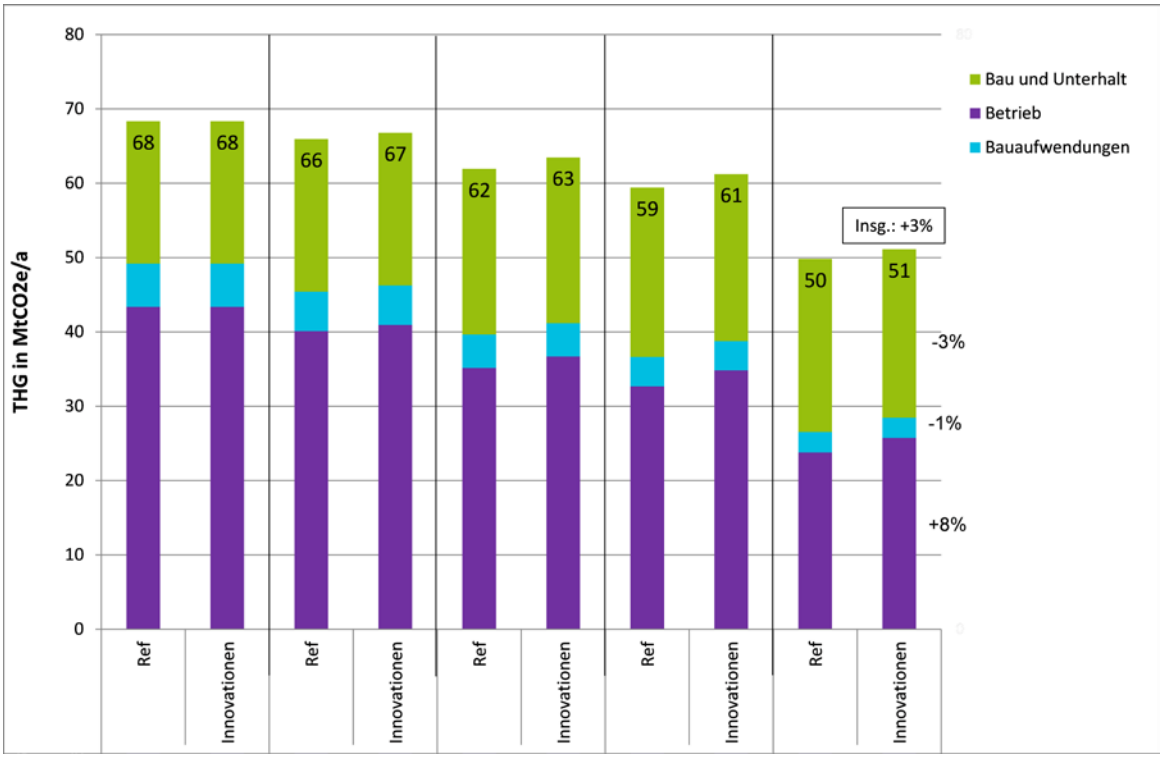

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 86: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 87: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario



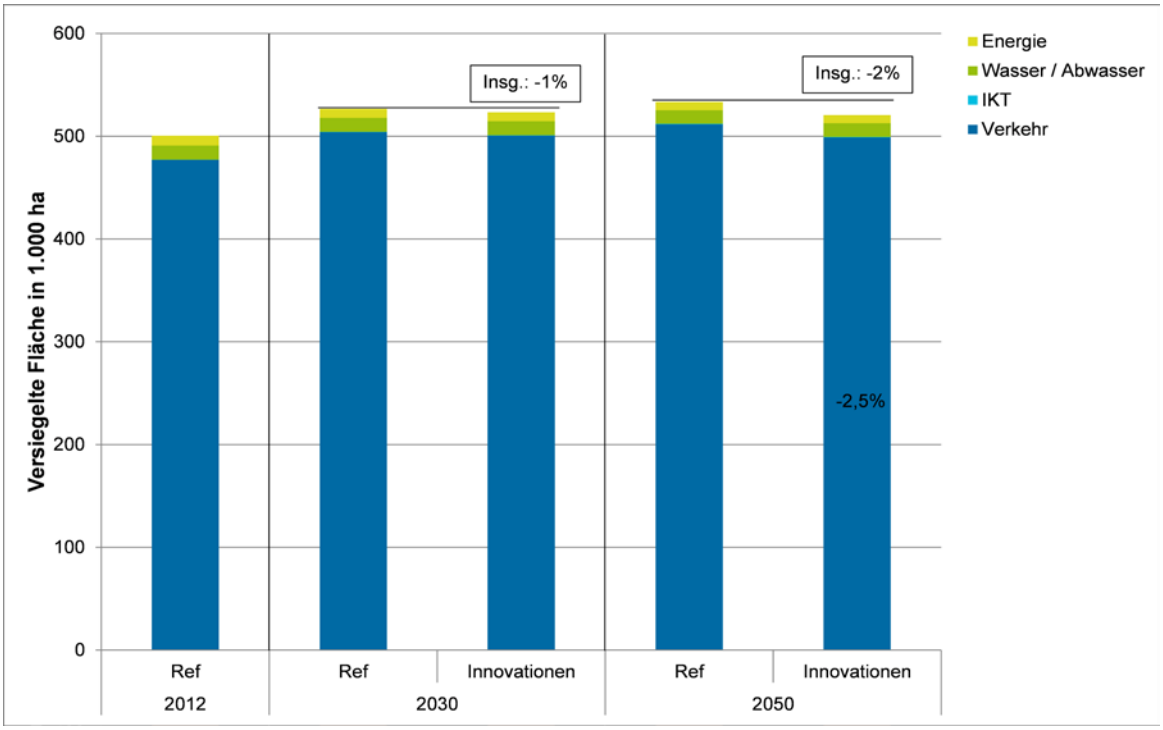

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Insgesamt liegen die THG-Emissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur im Jahr 2050 rund 3 % bzw. 1,3 Mt $CO_2$ äq/a über dem Referenzszenario. Ursache ist der zusätzliche Stromverbrauch der IKT-Infrastruktur. Dieser führt zu im Vergleich zum Referenzszenario 2 Mt $CO_2$ äq/a höheren Emissionen (+8 %) durch den Betrieb der Infrastruktur. Die durch die Bauaufwendungen verursachten Emissionen liegen dagegen rund 1 % bzw. 30.000 t $CO_2$ äq/a unter dem Referenzszenario. Die Minderung der fahrzeugseitigen Treibhausgasemissionen wurde nicht quantifiziert, dürften sich jedoch in einer ähnlichen Größenordnung wie der im Exkurs (Teil C Kapitel 2.4.4) betrachtete KEA bewegen, welche in dieser Fallstudie um 18 % unter dem Referenzszenario liegen. Die Höhe der THG-Emissionen im Aktuelle Maßnahmen-Szenario (Klimaschutzszenarien 2050), auf welches das Referenzszenario aufsetzt, beträgt im Jahr 2050 im Verkehrssektor (national) 89,6 Millionen Tonnen $CO_2$-Äquivalente (Repenning et al. 2015). Unterstellt man in der Fallstudie eine dem KEA entsprechende Minderung von 18 %, entspräche dies einer Emissionsminderung von 16 Millionen Tonnen in 2050 entsprechen. Fahrzeugseitig wird demzufolge das Vielfache der zusätzlichen Emissionen durch die Umgestaltung der Infrastruktur in der Fallstudie eingespart. Auch in Hinblick auf die sich mit den Materialbedarfen der Fahrzeugneuzulassungen im Jahr 2050 ergebenen THG-Emissionen zeigen sich im Vergleich zum Referenzszenario niedrigere Emissionen (-6 Mt $CO_2$ äq/a in 2050) (vgl. Exkurs in Teil C Kapitel 2.3.5).

Im **Flächenverbrauch** (versiegelte Fläche) sind bei einem Blick auf die absoluten Zahlen leichte Unterschiede gegenüber dem Referenzszenario zu sehen. Insbesondere der reduzierte Zubau bei der Straßenverkehrsinfrastruktur und die Nutzung ehemaliger Stellflächen haben einen großen Effekt. Insgesamt liegt die Flächeninanspruchnahme im Jahr 2050 rund 2 % unter dem Referenzszenario. Ursächlich ist eine Reduktion im Verkehrssektor um rund 12.900 ha im Vergleich zum Referenzszenario. Der Ausbau der IKT-Infrastruktur (Rechenzentren und Netze) haben im Gegensatz zum Verkehrs-

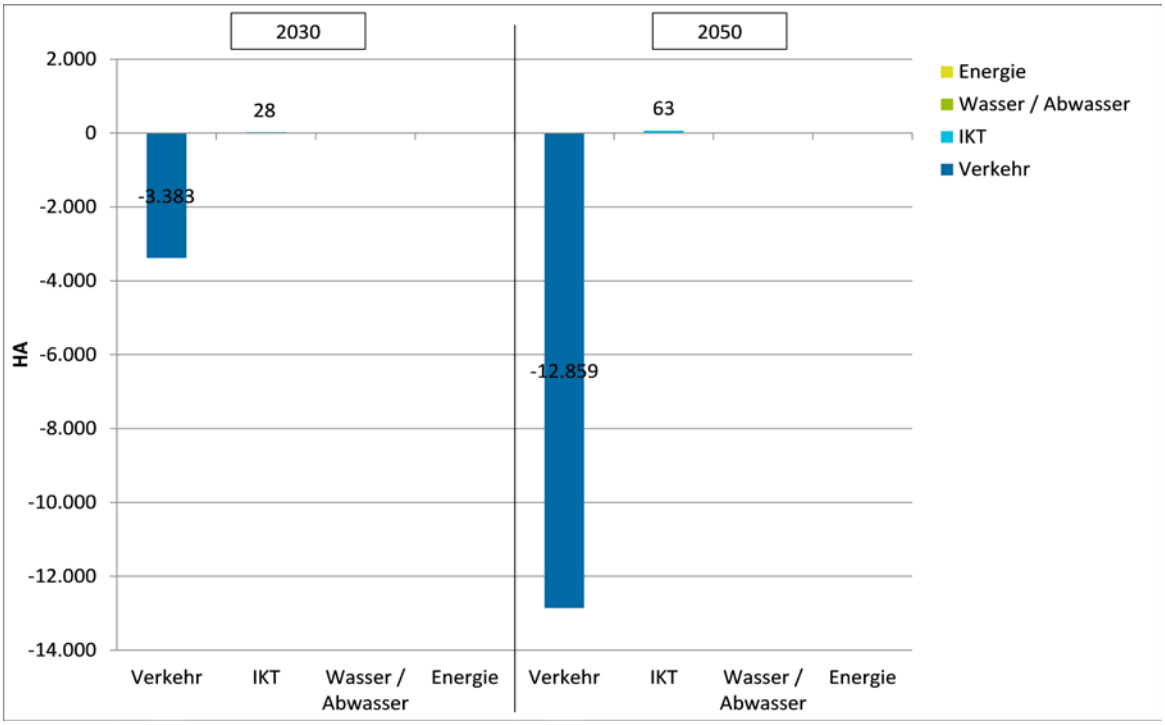
sektor geringe Auswirkungen auf die Flächeninanspruchnahme. Der Bau von Gebäuden für Rechenzentren nimmt hingegen nur 63 ha neuer Fläche in Anspruch (vgl. Abbildung 88 und Abbildung 89).

Abbildung 88: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

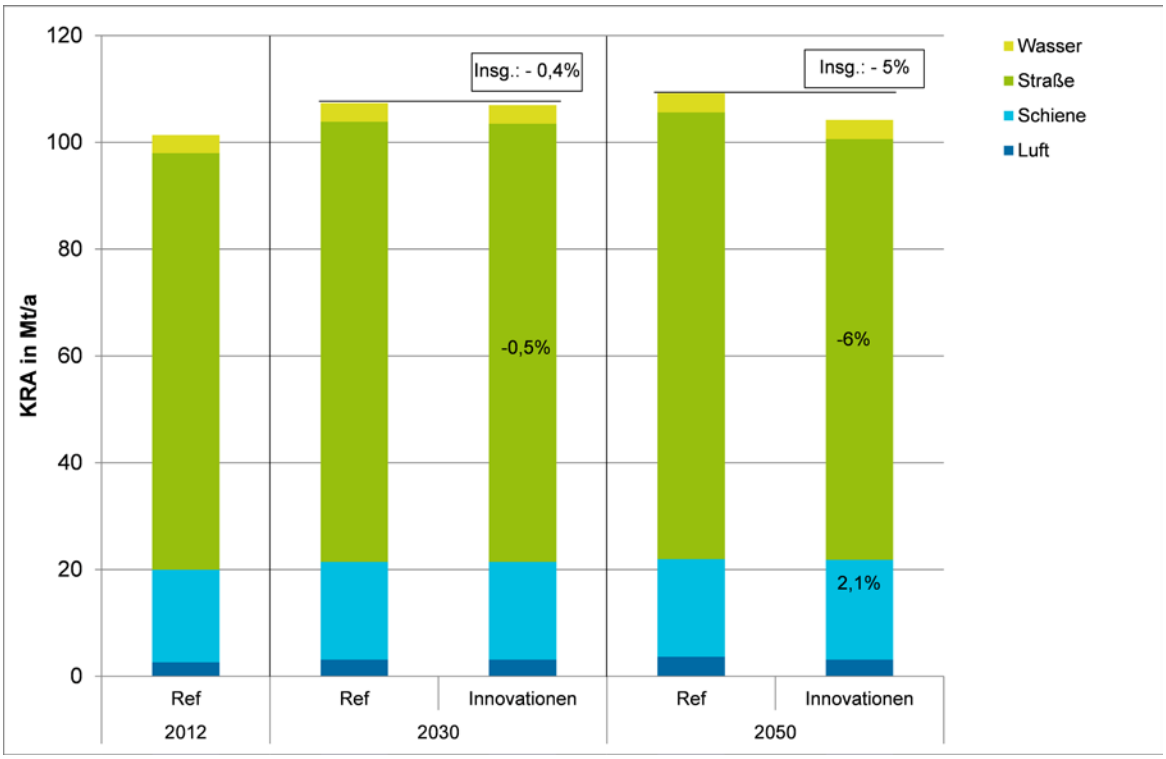
Abbildung 89: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die Detailbetrachtung für den Bau und Unterhalt der Infrastruktur in Abbildung 90 zeigt, dass der kumulierte Rohstoffaufwand auf Seiten der Verkehrsinfrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ insbesondere für die Straßenverkehrsinfrastruktur niedriger als im Referenzszenario ausfällt (liegt bei -6 % bzw. -4,8 Mt/a in 2050). Relativ gesehen liegt der KRA der Infrastruktur der Luftfahrt mit -15 % (0,5 Mt/a) sogar noch stärker unter dem Referenzszenario.

Abbildung 90: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ für die Verkehrsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.4.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

In dieser Fallstudie wurden die Auswirkungen durch eine Verkehrsverlagerung von der Straße auf die Schiene sowie verkehrsvermeidende Maßnahmen auf die Infrastruktur untersucht. Im Gegensatz zum Referenzszenario kann ab 2030 auf eine Erweiterung des Straßennetzes verzichtet werden. Zudem können Stellflächen auf Gemeindestraßen aufgrund des deutlich zurückgehenden Fahrzeugbestands einer anderen Nutzung zugeführt werden. Auf der anderen Seite erfordert das starke Wachstum auf der Schiene einen zusätzlichen Netzausbau gegenüber dem Referenzszenario. Ein zusätzlicher Ausbau der IKT-Infrastruktur stellt die Basis dar, um den Verkehr multimodal und effizient zu gestalten.

Insgesamt sinken die Parameter KRA, KEA, THG durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur und die Flächeninanspruchnahme (versiegelte Fläche) in dieser Fallstudie leicht gegenüber dem Referenzszenario. Dabei kommt insbesondere der geringere Ausbau des Straßennetzes zum Tragen, welcher größere Einsparungen mit sich bringt als der Ausbau der Schienenverkehrs- und IKT-infrastruktur. Insgesamt resultieren folgende Minderung gegenüber dem Referenzszenario:

- KRA: -2 %,
- KEA: -4 %,
- THG: -3 % und

- Versiegelte Fläche: -2 %.

Die zusätzliche Stromnachfrage der IKT-Infrastruktur führ jedoch dazu, dass mit der Fallstudie insgesamt durch Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur kaum oder keine Ressourcenleichtigkeitspotenziale gehoben werden können. Innerhalt der Systemgrenzen weicht die Fallstudie in Bezug auf die betrachteten Wirkungskategorien im Jahr 2050 wie folgt vom Referenzszenario ab:

- KRA: -1 %,
- KEA: ±0 % und
- THG: -3 %.

Auch in dieser Fallstudie ist es wichtig, die Systemgrenzen bei der Interpretation der Ergebnisse vor Auge zu haben. Dargestellt sind allein der durch die Infrastruktur verursachte kumulierte Energieverbrauch bzw. die THG-Emissionen. Diese stellen jedoch nur einen Bruchteil der Energieverbräuche und Emissionen aus dem Fahrzeugbetrieb auf der Verkehrsinfrastruktur dar. Durch die Verkehrsverlagerung und Vermeidung sinkt der Endenergieverbrauch im Fahrzeugbetrieb in dieser Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario. Dieses Potential befindet sich außerhalb der festgelegten Systemgrenzen. Im Exkurs in Teil C Kapitel 2.4.4 wird die Veränderung des Endenergiebedarfes des Fahrzeugbetriebes gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 abgeschätzt. In der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ liegt dieser rund -270 PJ/a (-18 %) unter dem Referenzszenario. Damit führen die in der Fallstudie angesiedelten Maßnahmen zu einem deutlich ressourcenleichteren Fahrzeugbetrieb. Die Energieeinsparungen auf Seiten des Fahrzeugbetriebs (Endenergieverbrauch) übersteigen den zusätzlichen KEA von 1,3 PJ/a im Jahr 2050 um ein vielfaches.

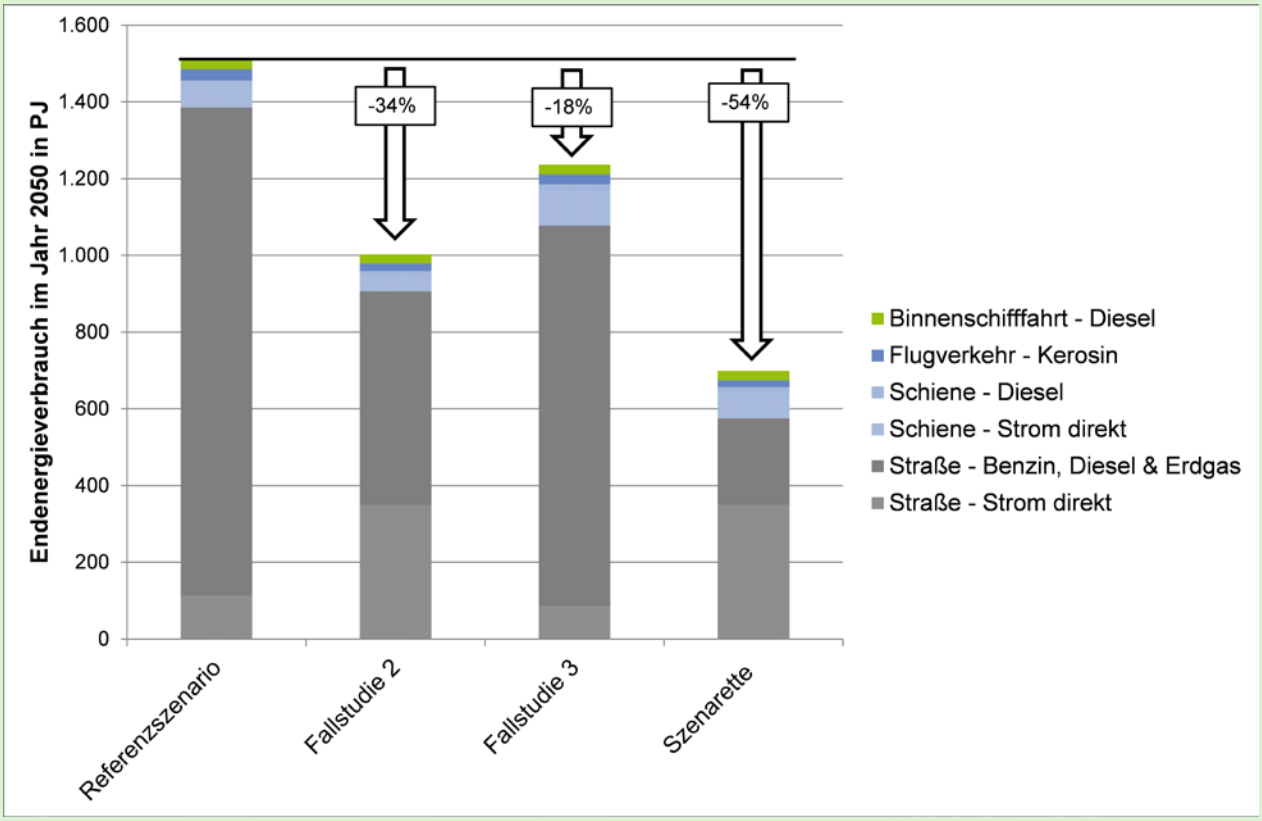
Ebenfalls nicht in die Systemgrenzen fällt der Bereich der Fahrzeuge. Hier lassen sich durch die Fallstudie weitere Ressourcenleichtigkeitspotenziale erschließen, die über die oben dargestellten Ergebnisse hinausgehen. Der Fahrzeugbestand und die Anzahl neu zugelassener Fahrzeuge liegt in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ deutlich unter dem Referenzszenario (vgl. Exkurs in Teil C Kapitel 2.3.5). Bei den Pkw sind im Jahr 2050 rund 32 Mio. Fahrzeuge im Bestand im Vergleich zu rund 43 Mio. im Referenzszenario (-25 %). Die Anzahl der Lkw sinkt und liegt 20 % unter dem Referenzszenario, was rund 650.000 entspricht. Lediglich die Anzahl der Busse steigt gegenüber dem Referenzszenario leicht (+7 %) auf 60.000 im Jahr 2050. Die Neuzulassungen in der Fallstudie im Jahr 2050 liegen bei den Pkw rund 400.000 Fahrzeuge unter dem Referenzszenario. Bei den leichten Nutzfahrzeugen sind es 44.000, bei den Lkw (inkl. Sattelzüge) sind es rund 23.900. Im Vergleich zum Referenzszenario steigt hingegen die Zahl neuer Busse um rund 600. Durch die mit dem Materialbedarf der Fahrzeuge einhergehende KRA, KEA und THG ergeben sich im Jahr 2050 in der Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario eine Reduktion um 6 Millionen Tonnen (KRA), 42 PJ (KEA) bzw. 3 Millionen t $CO_2$-Äquivalente.

Die Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ besitzt innerhalb der Systemgrenzen keine oder kaum Potenzial die Ressourceninanspruchnahme zu verringert. Unter Einbezug der Fahrzeugproduktion und des Fahrzeugbetriebes zeigt sich jedoch, dass in ihr große Ressourcenleichtigkeitspotenziale angesiedelt sind.

## Exkurs: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor

In den dargestellten Ergebnissen sind zwar mit dem Betrieb der Infrastruktur Energieverbräuche z. B. durch den Betrieb der Lichtzeichenanlagen oder dem Tunnelbetrieb enthalten, unberücksichtigt bleibt jedoch der Fahrbetrieb.
Sowohl in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ (Fallstudie 3), in der in Teil C Kapitel 2.3 beschriebenen Fallstudie „Kopplung Energie-Verkehr“ (Fallstudie 2) als auch in der Szenarette „Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung“ (Teil C Kapitel 3.3.2) führen die getroffenen Annahmen zu einer deutlichen Reduktion des Endenergieverbrauches des Fahrzeugbetriebs. Treiber sind höhere Energieeffizienz neuer Antriebskonzepte (Fallstudie 2 und Szenarette) sowie Verkehrsvermeidung und Verlagerung (Fallstudie 3 und Szenarette).
In Abbildung 91 wird der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (national) für das Referenzszenario, die genannten Fallstudien und die Szenarette im Jahr 2050 dargestellt. Die Abschätzung basiert auf den Berechnungen der Klimaschutzszenarien 2050 (2. Modellierungsrunde) (Repenning et al 2015).
Für das **Referenzszenario** wurde davon ausgegangen, dass sowohl die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes als auch die Verkehrsleistung dem Aktuelle Maßnahmen Szenario (AMS) der Klimaschutzszenarien entspricht.
Bei der Berechnung des Endenergieverbrauches des Fahrzeugbetriebes in **Fallstudie 2** entspricht die Verkehrsleistung dem AMS. Die Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes und die elektrischen Fahrleistungsanteile im Straßenverkehr wurden anhand des Klimaschutzszenarios KS 95 (Minderung der THG-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 95 %) abgeleitet, wobei die zusätzliche Stromnachfrage und damit die elektrischen Fahrleistungsanteile gedeckelt wurde, so dass sie die zusätzliche im KS 95 gegenüber dem AMS nicht übersteigt, da ansonsten ein übermäßiger Zubau an erneuerbaren Erzeugungsanlagen in Deutschland unterstellt würde.
Die unterstellte Verkehrsleistung in **Fallstudie 3** entspricht dem KS 95, hinsichtlich der Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes wurde hingegen auf das AMS zurückgegriffen.
Die **Szenarette** „Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung“ setzt sowohl bei der Verkehrsleistung als auch beim Fahrzeugbestand auf dem KS 95 auf.

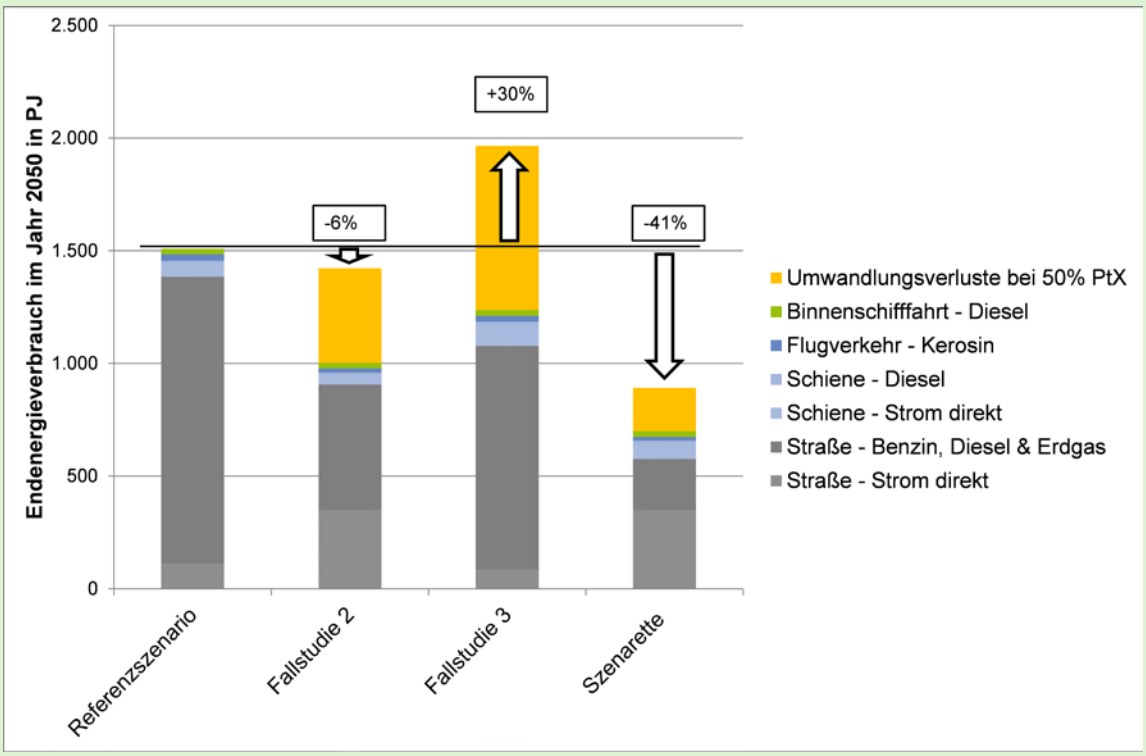
Abbildung 91: Endenergieverbrauch im Referenzszenario, Fallstudie2, Fallstudie 3 und der Szenarette im Jahr 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die in den Fallstudien und der Szenarette umgesetzten Maßnahmen zu einer jeweils deutlichen Reduzierung des Endenergieverbrauches führen.
Während der kumulierte Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in **Fallstudie 2** im Jahr 2050 um 2 PJ/a ansteigt wird der Endenergieverbrauch im Fahrzeugbetrieb um über 500 PJ/a (-34 %) verringert.
In **Fallstudie 3** erhöht sich der kumulierte Energieaufwand in 2050 gegenüber dem Referenzszenario um rund 1 PJ/a, der Endenergieverbrauch des Fahrzeugbetriebes nimmt jedoch um rund 270 PJ/a (-18 %) ab.
In der **Szenarette** liegt der Endenergieverbrauch des Fahrzeugbetriebes im Jahr 2050 mit rund 700 PJ/a rund 54 % unter dem Referenzszenario, wodurch sich eine Einsparung von 810 PJ/a ergibt. Der kumulierte Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur liegt im Jahr 2050 in der Szenarette rund 7 PJ/a über dem Referenzszenario.
Auch wenn der Endenergieverbrauch auf Fahrzeugebene nicht direkt mit dem kumuliertem Energieaufwand zu vergleichen ist zeigen die Ergebnisse deutlich, dass durch die Einsparungen auf Seiten des Fahrzeugbetriebes die zusätzlichen Aufwände beim KEA mehr als überkompensiert werden. Die zwei Fallbeispiele sowie die Szenarette können also in Hinblick auf den Energieverbrauch als ressourcenleicht bezeichnet werden, da sie eine ressourcenleichte Nutzung der Verkehrsinfrastruktur ermöglichen.
Im KS 95 wird neben der Durchdringung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten von einem verstärkten Einsatz von PtX-Kraftstoffen ausgegangen. Im Jahr 2050 liegt der Anteil an PtX-Kraftstoffen an den verbleibenden Kraftsoffen (Diesel, Benzin, Erdgas, Kerosin) bei 50 %. In Fallstudie 2 wird davon ausgegangen, dass diese PtX-Kraftstoffe über Importe bereitgestellt werden. In der nachfolgenden Abbildung wird die Abschätzung des Endenergieverbrauches um die Umwandlungsverluste (Elektrolyse, Syntheseprozess und Verteilung) von erneuerbar erzeugtem Strom in PtX-Kraftstoffe ergänzt. Dabei wird ein Systemwirkungsgrad bei der Herstellung von PtX-Kraftstoffen von 42 % unterstellt[84].

Abbildung 92: Endenergieverbrauch und PtX Umwandlungsverluste im Referenzszenario, Fallstudie 2, Fallstudie 3 und der Szenarette im Jahr 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 92 zeigt deutlich, dass die Verwendung von PtX-Kraftstoffen, welche durch den Klimaschutz begründet

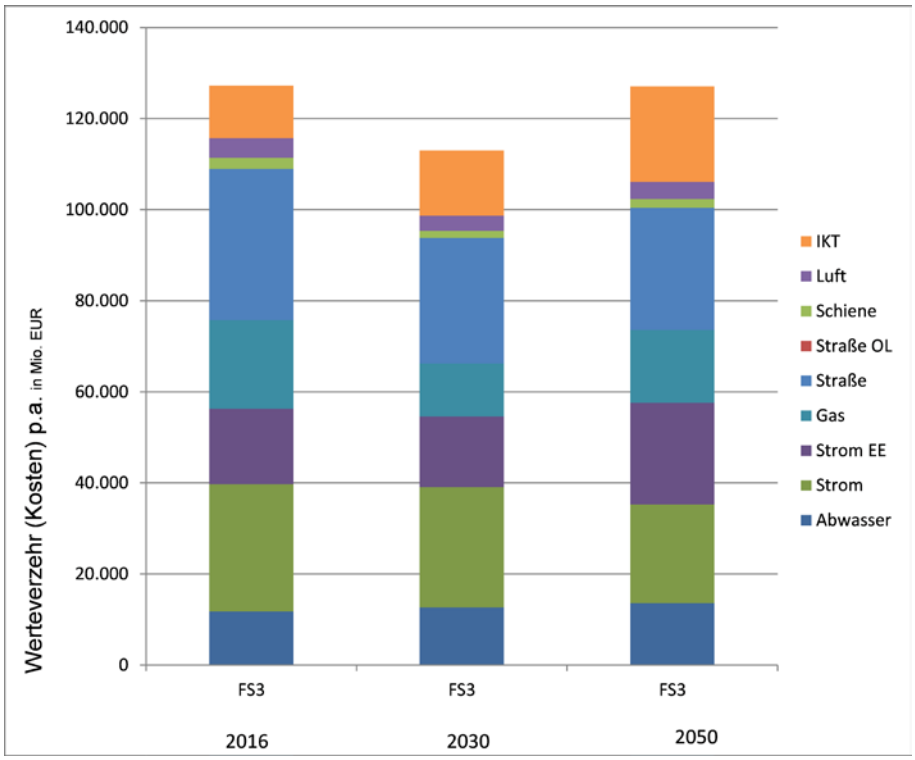
84 Kasten et al. 2013 nennen für zukünftige PtL- Kraftstoffe Wirkungsgrade 32-38 % (atmosphärische $CO_2$-Quelle) bzw. 39-48 % (Bereitstellung von $CO_2$ aus industriellen Prozessen).

ist, zu einer Erhöhung des Energieverbrauches führt. Das Effizienzpotenzial verringert sich bei Berücksichtigung eines Anteils von 50 % an PtX-Kraftstoffen in Fallstudie 2 auf nur noch 6 % und in der Szenarette auf nur noch 41 %. Aufgrund des hohen Anteils an Kraftstoffen in Fallstudie 3 erhöht sich der Energieverbrauch gegenüber dem Referenzszenario durch die Nutzung von PtX-Kraftstoffen sogar um 30 %. Die Abbildung verdeutlicht, dass es sowohl aus perspektive der Ressourcenleichtigkeit als auch aus Sicht des Klimaschutzes sinnvoll ist sowohl technische Ansätze zu verfolgen (Elektrifizierung des Verkehrs) als auch verkehrsvermeidende Maßnahmen und Maßnahmen zur Verkehrsverlagerung umzusetzen (Szenarette).

### 2.4.6 Abschätzung der Kostenentwicklung in der Fallstudie

Aufgrund der in der Fallstudie zugrunde gelegten Annahmen zu Anpassungen der Infrastruktur ergeben sich gegenüber dem Referenzszenario lediglich geringe Veränderungen bei den Kapitalkosten. Die grundsätzliche Einschätzung einer stabilen Kostenentwicklung bleibt bestehen (vgl. Abbildung 93).

Abbildung 93: Kapitalkosten in der Fallstudie 3 „Innovationen im Verkehr“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.4.7 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie

Ergänzend zu der orientierenden Stoffstromanalyse und der Abschätzung der Kostenentwicklung wurde die Fallstudie einer Einschätzung ihre Potenziale und Effekte auf die qualitativen Kriterien gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe von Bürgerinnen und Bürgern, Flexibilität, Reversibilität und Resilienz (vgl. Teil A Kapitel 3) unterzogen.

Die **gesellschaftliche Akzeptanz** der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ ist zum einen abhängig vom räumlichen Kontext, in dem die Maßnahmen zum Einsatz kommen. Denn je nachdem, ob im ländlichen oder städtischen Raum werden die einzelnen Maßnahmen wie z. B. eine Veränderung im Modal Split, Carsharing- oder Ridesharing-Optionen sehr unterschiedlich konkret und zur Anwendung kommen können.

Zum anderen ist die Akzeptanz der Fallstudie abhängig von Lebensstilen bzw. „Lebenswelten“ (vgl. Sinus-Milieus[85]) der Menschen. Personen bzw. Lebensstile mit einer ausgeprägten Autoaffinität werden die Maßnahmen der Verkehrsvermeidung anders annehmen und bewerten als Vertreter eines „sozialökologischen Milieus“. Und ggf. spielt auch das Alter der Nutzer (Generationenfrage) eine Rolle, etwa im Hinblick auf den Umgang und die Affinität zu IKT-Lösungen, die in dieser Fallstudie für neue Formen der Vernetzung multimodaler Mobilität benötigt werden. Die dichte Ausstattung mit IKT-Infrastruktur zur Steuerung der Verkehre erfordert einen flächendeckenden Aufbau von Funkmasten. Die mit den Funknetzen verbundenen Strahlenemissionen kann die „gesellschaftliche Akzeptanz“ in Teilen der Bevölkerung ggf. einschränken.

Ein wichtiger Punkt im Zusammenhang mit IKT basierten Maßnahmen (z. B. Mobilitätsapps, aber auch Autonomes Fahren) ist die Sicherheit und Bedienungsfreundlichkeit der Maßnahmen als Kriterien für die Zukunftsfähigkeit der Fallstudie. Wenn mit den denkbaren Maßnahmen zur Einschränkung der Autonutzung angemessene bzw. „bequeme“ und „zugängliche“ Alternativen angeboten werden, wird die Akzeptanz höher ausfallen als ohne adäquate Alternativen – zumindest in bestimmten Lebensstil-Gruppen. Wenn es also gelingt, im Rahmen der Fallstudie attraktive Dienstleistungen und Infrastrukturen zu entwickeln, dürfte sich die Nachfrage nach diesen Dienstleistungen erhöhen und auch die Akzeptanz insgesamt steigen. Die „Attraktivität“ der Dienstleistungen kann sich sowohl auf den Preis als auch auf die Bedienungs- und Nutzerfreundlichkeit oder Bequemlichkeit beziehen.

Denkbar sind aber verschiedene Akzeptanzprobleme bei autonom fahrenden Fahrzeugen. Zum einen kann es bei einigen Autofahrer unerwünscht sein, dass Fahrzeug nicht selbst steuern zu können (Fahrspaß). Zum anderen bestehen aus heutiger Sicht noch viele offene Rechts-, Sicherheits- und ethische Fragen, die die allgemeine Akzeptanz nicht fördern.

Einige Maßnahmen können ggf. zu geringeren Kosten für Mobilität führen und damit zur Akzeptanz beitragen. Z. B. ist die Nutzung des ÖPNV regelmäßig mit geringeren privaten Mobilitätskosten verbunden als die private Autonutzung (bei Vollkostenrechnung). Das Gleiche trifft auf die Nutzung von Sharing-Angeboten i.V. zum privaten Besitz von Fahrzeugen zu.

Für die **Teilhabe**[86] der Bürgerinnen und Bürger sind im Rahmen dieser Fallstudie einige Potenziale angelegt. Bürger können als Mobilitätsanbieter auftreten, wenn über IKT-Vernetzung Car- und Ridesharing-Angebote ermöglicht werden und Verbreitung finden. Wiederum sind die unterschiedlichen räumlichen Kontexte zu beachten: Für Mobilität im ländlichen Raum bieten sich neue Teilhabemöglichkeiten, wenn etwa ehrenamtliche Mobilitätsangebote (z. B. Bürgerbusse) vermehrt aufkommen. In dünnbesiedelten, ländlichen Räumen (die ggf. mit Bevölkerungsrückgang umgehen müssen) ist die Selbstorganisation der BürgerInnen als ein wichtiger Schlüssel zu sehen, Mobilität (in Zukunft) zu sichern. So gesehen ist ein hohes Maß an Teilhabe bzw. Mitwirkung und Leistungserbringung durch BürgerInnen erforderlich. Dazu sind auch neue Formen der Governance von zivilgesellschaftlichen (ggf. ehrenamtlich), unternehmerischen und öffentlichen Mobilitätsangeboten gefragt.

Demgegenüber werden neue bzw. zusätzliche Mobilitätsangebote in Städten vermutlich eher durch (große) private Unternehmen angeboten. So beschränkt sich in der Stadt der Umgang mit den veränderten Mobilitätsangeboten eher auf die Rolle eines Kunden von privat angebotenen Mobilitätdienstleistungen (Bsp. Uber). Inwiefern damit ggf. auch ein Weniger an (politischer) Teilhabe verbunden ist (etwa wenn der ÖPNV zurückgeht), ist nicht eindeutig zu bestimmen. In der Durchdringung mit IKT können auch Potenziale für eine Demokratisierung aufgrund von open data gesehen werden, wenn Verkehrsdaten frei zugänglich sind und sich BürgerInnen in der Planung der Verkehrsinfrastrukturen

85 http://www.sinus-institut.de/sinus-loesungen/sinus-milieus-deutschland/

86 Nicht gemeint ist hier, dass mit einer höheren Teilhabe einer Person an Mobilität diese insgesamt im Sinne von Verkehrsleistung gesteigert wird. Es geht nicht um die Nutzung und Realisierung von Mobilität als solche.

informiert einbringen können. In bestimmten Bereichen können sich auch in städtischen Räumen zivilgesellschaftliche oder Mischformen der Teilhabe bei der Organisation von Mobilitätsangeboten entwickeln. So können Plattformen zum Informationsaustausch und Anbahnung von Interaktion zwischen Privatpersonen dienen. Genannt sei hier die Vermittlung von privaten Sharing-Angeboten wie drivy oder tamcya. Ähnliches trifft auf Portale oder Anzeigen für die Gruppenbildung für Fahrkartenangebote der Bahn zu.

Die Plattformen zur Vermittlung von Mobilitätsangeboten speisen sich immer mehr nach dem crowd sourcing-Prinzip, d. h. immer stärker werden private Leistungen, Fahrzeuge, Informationen eingespeist. Insgesamt ist so eine Tendenz zur Erhöhung der Teilhabe der Bürgerinnen und Bürger im Rahmen dieser Fallstudie angelegt; dies gilt insbesondere für den ländlichen Raum.

Für die Einschätzung der **Resilienz** (bzw. Vulnerabilität) der Fallstudie ist die Art der Störung bzw. des Extremereignisses, das auf das System wirkt zu unterscheiden. So dürfte die „Alltagsresilienz" gegenüber dem Referenzszenario steigen, wenn kleine Störungen (z. B. Stau, kurzfristige Straßensperrungen oder Ausfälle) besser aufgefangen werden können. Die Nutzer sind multimodale Verkehrsmittelbenutzung gewohnt und damit besser als heute in der Lage, situationsangepasst das Verkehrsmittel und den Verkehrsweg zu wählen, der situationsspezifisch den geringsten Störungen unterliegt. Auch erweitert sich das Angebot von Mobilitätsalternativen durch die stärkere Einbeziehung von privaten Kapazitäten (Mitnahme in privaten Fahrzeugen) oder dieses Angebot wird transparenter durch leichter verfügbare Informationen.

Demgegenüber kann die in der Fallstudie angelegte Verlagerung von Verkehr auf die Schiene zu einer Abnahme der Resilienz im Gesamtsystem führen, wenn man davon ausgeht, dass das Schienennetz grobmaschiger ist als das Straßennetz und der Ausfall eines Stranges/Verbindung einen großräumigeren Effekt hat (vgl. Beispiel Sperrung Elbbrücke bei Magdeburg auf der Strecke Berlin–Hannover). Die Wirkungen der Sperrung eines Schienenweges aufgrund eines Sturmschadens oder Überschwemmung hat in der Regel größere Folgen für das System als die Sperrung einer Straße. So gesehen kann der (überregionale) Schienenverkehr als störanfälliger eingestuft werden.

Andererseits bietet der Schienenverkehr mit Blick auf die „Alltagsresilienz" durchaus Vorteile. Der Bahnverkehr kann eine höhere Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit als der Straßenverkehr liefern, ist der doch grundsätzlich deterministisch vorhersagbar. Insofern kann die in der Fallstudie angelegte Verkehrsverlagerung auf die Schiene zu einer Erhöhung der Resilienz im Gesamtsystem führen. Indes bedarf es dafür des erheblichen Ausbaus des Schienennetzes (Überholstrecken, Weichen/Kreuzungen, Alternativstrecken, Knotenpunkte, Zugangspunkte, moderne Sicherungs- und Leittechnik ECTS usw.), da die Kapazitäten insbesondere für eine deutliche Erhöhung des Schienengüterverkehrs aktuell nicht gegeben sind.

Ebenso kann die in der Fallstudie angelegte umfassende und tiefgehende Digitalisierung des Verkehrssektors als problematisch eingeschätzt werden. IKT gesteuerte und vernetze Infrastrukturen sind vulnerabel gegenüber Hackerangriffen. Dies gilt für das Hacken von autonomen Fahrzeugen ebenso wie für die „smarte" Verkehrssteuerung auf Straße und Schiene. Da digitale Steuerung von Strom abhängig ist, kann auch ein flächendeckender Stromausfall in dieser Fallstudie zu dramatischen Folgen für das Verkehrssystem führen. Hier hängt die Resilienz (wie auch in vielen anderen Systemen) von der technischen Konfiguration und den einzelnen Komponenten ab, aber auch von der Reaktionsfähigkeit der Akteure im System. Auf der anderen Seite wirkt die teilweise Ausstattung mit eigenen Kommunikations-, Steuerungs- und Energieversorgungssystemen im Schienennetz resilienzsteigernd, da sie z. T. parallel und unabhängig von anderen Leitungssystemen angelegt sind und somit der Ausfall der öffentlichen Energieversorgung weniger Auswirkungen auf den Bahnverkehr hat.

Mit Blick auf klimatische Extremereignisse (Starkregen, Extremhitze, Orkan) wird die Resilienz als relativ hoch eingeschätzt – wenn gleich diese in hohem Maße von spezifischen regionalen und bauli-

chen Charakteristika abhängt: Die Sperrung einer Zugstrecke aufgrund von Hochwasser kam in Deutschland in der Vergangenheit wiederholt vor. Noch öfter wurden Straßen wegen starker Regenfälle, Schnee und Eis gesperrt oder durch Hochwasser zerstört. Extreme Hitze kann sowohl Straßenasphalt auflösen und auf Betonplatten-Straßen zu blow-ups als auch zu Schienenverwerfungen führen.

Unter Flexibilität wird im Kontext von RELIS die Anpassungsfähigkeit eines Systems an veränderte Rahmen- und Umweltbedingungen verstanden. Zur Einschätzung der **Flexibilität**, die in der Fallstudie angelegt ist, lassen sich u.a. folgende Argumente benennen. Durch die Kombination technischer, insb. digitaler, und auch sozialer Innovationen im Verkehrssektor (wie z. B. Ride-Sharing) entwickelt sich eine Vielfalt an Mobilitätsmöglichkeiten, die oft auch Nutzungsalternativen erhöhen. Die intermodale und multimodale Flexibilität im System steigt und damit die Anpassungsfähigkeit an veränderte Nachfragen oder Auslastungen von Verkehrsinfrastruktur. Sowohl aus Nutzer- als auch aus Planungsperspektive können die verschiedenen inter-/multimodalen Mobilitätsoptionen unter Gesichtspunkten einer flexiblen Anpassung eingesetzt werden. Die intermodale Flexibilität bietet Ausweichmöglichkeiten für die Nutzerinnen und Nutzer von Verkehrsinfrastrukturen und der Verkehrsmittel. Die in der Fallstudie von den Nutzern eingebübte multimodale Verkehrsträgernutzung führt zu einer gedanklichen und praktischen Handlungsflexibilität, die wie zuvor genannt auch ein Argument im Zusammenhang mit Resilienz ist. Aus planerischer Sicht können die verkehrlichen Infrastrukturen für unterschiedliche Verkehre und Mobilitätsdienstleistungen ausgelegt, dem Bedarf besser angepasst und besser ausgelastet werden.

Da in RELIS das Flexibilitätskriterium auf das System und nicht auf die Sicht eines einzelnen Nutzers angelegt wird, mag der Wegfall des privaten Autos zwar die individuelle Flexibilität (im Sinne von Freiheit) reduzieren, die Flexibilität des Systems ist hiervon jedoch nicht negativ berührt.

Die **Reversibilität** (Rückbaufähigkeit) von Verkehrsinfrastrukturen kann technisch insgesamt als gut eingeschätzt werden – wenn auch mit erheblichen Unterschieden in den einzelnen Netzen (Straße: Autobahn, Fahrradweg; Schiene, Wasser, Luft). Problematischer dürfte die politische Frage des Rückbaus sein. Vermutlich ist weniger von einem vollständigen Rückbau als von einer Umnutzung[87] bzw. Umwidmung einzelner Infrastrukturen auszugehen.

Mit den Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung ist eine Reduktion von verkehrsbedingten THG- und Luftschadstoff-Emissionen, Flächeninanspruchnahme und Lärm verbunden. Auch dürften Unfälle zurückgehen und die Gesundheit der Bevölkerung (in Städten) sich verbessern. Insgesamt gewinnt die Aufenthaltsqualität auch von Naturräumen durch die Verkehrsaufwandsreduktion gerade von umweltschädlichen Verkehren.

## 2.5 Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“

### 2.5.1 Das Szenario im Jahr 2050

Grundsätzlich lässt sich eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichten Ausgestaltung der Infrastruktur auch durch den Einsatz von „ressourcenleichteren“ Materialien und Herstellungsprozessen erzielen. Insbesondere dort, wo die Förderung von Primärrohstoffen zu einer hohen Ressourceninanspruchnahme führt und energieintensive Aufbereitungsschritte (z. B. in der Produktion von Nichteisenmetallen) notwendig sind, kann eine Erhöhung des Einsatzes von Sekundärmaterial sinnvoll sein. Wie die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse zeigen, entfällt ein Großteil der bilanzierten Umweltauswirkungen auf den Bereich der Straßenverkehrsinfrastruktur (vgl. Teil C Kap.

87 Denkbar ist z. B. die Anlage von Radwegen auf stillgelegten Bahnstrecken, die formal weiter als Bahnstrecken (quasi als Vorhaltung) gewidmet sind. So bleibt auch die Flexibilität vorhanden, diese ggf. später wieder als Bahnstrecke zu reaktivieren.

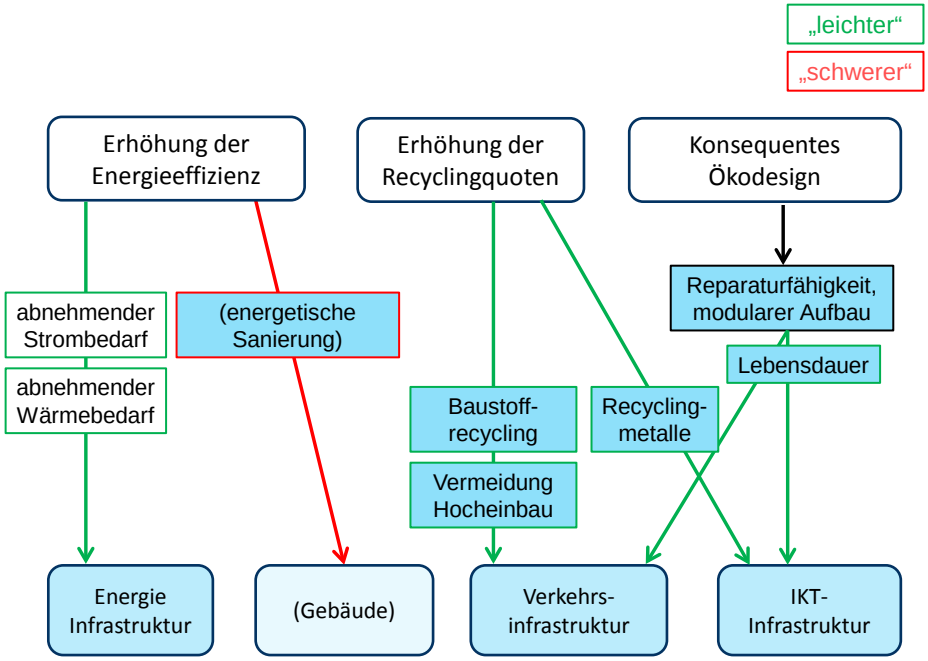
1.2). Obwohl derzeit bereits große Teile des aufgebrochenen Asphalts von rund 90 % (DAV 2014) im Straßenbau recycelt werden, bestehen, z. B. durch den Verzicht auf Hocheinbau[88], weitere Recyclingpotenziale. Dafür sind ggf. Anpassungen in den entsprechenden Richtlinien und politische Zielvorgaben notwendig. Auch zeigen Knappe et al. (2016), dass die statistisch ermittelten Zahlen zu Altasphalt und Recyclingquoten nicht die Realität abbilden, und kommen über ein theoretisch höheres verfügbares Altasphaltaufkommen im Vergleich zu den erfassten Zahlen um Faktor 2,5 zu einer realen Recyclingquote von nur knapp 40 %.

Die Erhöhung der Energieeffizienz insbesondere durch die energetische Sanierung im Gebäudebestand hat das Ziel, den Einsatz von fossilen Energieträgern zu verringern. Neben den Auswirkungen auf die Energieversorgungsnetze mit lokalen Auslastungsrisiken der Gasnetze kann eine Reduktion des Stromverbrauchs auch den Bedarf an Erzeugungskapazitäten verringern.

Ein wesentlicher Ansatz für eine ressourcenleichte Infrastruktur liegt darin, die einzelnen Bestandteile bedarfsgerecht auszulegen. Eine übermäßige Beanspruchung kann zu zusätzlicher Ressourceninanspruchnahme durch zusätzlichen Instandhaltungsaufwand führen. Verändern sich die Anforderungen an die Infrastrukturbestandteile mit der Zeit, wie bspw. durch ein zunehmendes Fahrzeuggewicht oder steigendes Verkehrsaufkommen, ist es hilfreich, wenn eine Anpassung an neue Anforderungen möglichst mit geringem Aufwand möglich ist (z. B. durch eine modulare Bauweise von Brückenbauwerken). Dies kann die Lebensdauer verlängern, die Ressourceninanspruchnahme der Errichtung wird über einen längeren Zeitraum „abgeschrieben“. Ähnlich sieht es bei Anlagen und Produkten aus, diese können bereits in der Planungsphase so gestaltet werden, dass über den Produktlebenszyklus möglichst geringe Mengen an Ressourcen in Anspruch genommen werden. Dieses als Ökodesign bezeichnete Vorgehen legt einen Fokus auf hohe Produktlebensdauer, welche auch durch gute Reparierfähigkeit bzw. die Möglichkeit, veraltete Komponenten auszutauschen (bspw. bei der Serverinfrastruktur), erzielt (vgl. Teil B Kapitel 3.4.2).

88 Hocheinbau bezeichnet ein Erneuerungsverfahren, bei dem Material auf dem vorhandenen Straßenkörper aufgetragen oder „eingebaut“ wird. Es werden lediglich die Deckschicht des vorhandenen Straßenkörpers abgetragen (rund 4 cm) und ein neuer fester Oberbau (10–12cm) eingebaut. Die unteren Schichten des vorhandenen Straßenkörpers bleiben dabei unangetastet. Hocheinbau führt immer zu einer Zunahme im Materialeinsatz, da der vertikale Aufbau größer wird.

Abbildung 94: Wirkungsgefüge der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Das Strategiepaket zielt primär auf folgende der eingangs genannten Stellschrauben für Ressourcenleichtigkeit ab:

- Verzicht auf Neubau von technischen Infrastrukturen
- Verlängerung der Nutzungsdauer
- Einsatz von weniger und „leichteren“ Materialien

Das Strategiepaket „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ lässt sich in folgendem Bild für das Jahr 2050 resümieren:
Ökodesign hat sich verstärkt durchgesetzt, so dass Produkte und Bauwerke schon bei der Planung so gestaltet werden, dass sie besonders energieeffizient sind und durch einen modularen Aufbau und Reparaturfähigkeit lange Lebensdauern besitzen.
Die hohe Sanierungsrate im Gebäudebestand hat den Heizenergiebedarf stark verringert, weshalb weniger Energieerzeugungskapazitäten errichtet werden mussten.
Die Verwendung von Recyclingmaterial hat sich in weiten Teilen der (Bau-)Wirtschaft durchgesetzt.

### 2.5.2 Ausgewählte Maßnahmen und Optionen

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden Optionen bzw. Maßnahmen, die in dieser Fallstudie beispielhaft zur Implementation kommen, verschiedenen Bereichen und Dimensionen von Infrastruktursystemen zugeordnet:

Bereich Ökodesign

- Modularer Aufbau und Erweiterbarkeit der Geräte (Updatefähigkeit) (z. B. Server in IKT, Re-Powering von Windenergieanlagen)
- Recyclinggerechte Konstruktion (Trennbarkeit der Materialien, Verwendung sortenreiner Materialien, Kennzeichnung, Baugruppen, Schadstoffentfrachtung)

- Intelligentes Design von Ingenieursbauwerken zur besseren Instandhaltung und Belastungsanpassung

Bereich Recyclingquote

- Anpassung der „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO)
- Vermeidung Hocheinbau, Erhöhung der „erlaubten“ RC-Quoten
- Vorgaben für Mindesteinsatz von Recyclingmaterial (auch in Situ) bei Instandhaltungsarbeiten, sowohl für gebundenes als auch ungeb. Material.
- Überprüfung des Einsatzes von Recyclingmaterial, Vermeidung von Down-Cycling
- Nutzung von Recycling-Baumaterialien (RC-Beton) in kommunalen Tiefbaumaßnahmen (kommunale Selbstverpflichtung)
- Einführung von Rücknahmeverpflichtungen und Recyclingquoten für IKT-Geräte
- Entwicklung von Recyclingverfahren für seltene und wertvolle Substanzen in Elektronik-Komponenten

Bereich Energieeinsparungen

- Energetische Sanierung im Gebäudebestand (vgl. EnEV und ambitioniertere Modernisierung KS-Szenario 80/90)
- Optionen zur Erhöhung der Energieeffizienz (Strom) in:
  5. IKT (Endgeräte, Rechenzentren)
  6. Beleuchtung (LED-Straßenbeleuchtung und Gebäude)
  7. Konsumgüter

Maßnahmen im Strategiepaket „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ – Bereich Governance

- Schärfung bestehender Zielvorgaben, um Unsicherheiten abzubauen.
- Erweiterung bzw. Entwicklung von Energie- bzw. Rohstoffsteuern,
- Standardisierung für besseres Recycling.

### 2.5.3 Annahmen der Infrastrukturentwicklung im Rahmen der Fallstudie

Nicht alle der zuvor genannten Optionen und Maßnahmen können für die Berechnungen im Rahmen der orientierenden Stoffstromanalyse mit Daten unterlegt und operationalisiert werden. Für einzelne Maßnahmen kann die Wirkung auf Ressourcenleichtigkeit nicht zu quantifiziert bzw. allenfalls in empirischen Studien fallweise bestimmt werden. Vor dem Hintergrund der hohen Aggregationsebene der Analysen im Rahmen des Vorhabens RELIS wurden aus den o. g. Optionen und Maßnahmen folgende Annahmen zur Entwicklung der Infrastrukturbestände abgeleitet:

- Aufgrund von Zwischenergebnissen des Projekts „Flächensparende Straßennetzgestaltung“ des Umweltbundesamtes wurden für die Straßenkategorien **Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen** Rückbaupotentiale hochgerechnet. Insgesamt führt dies zu einer Reduktion von 1,5 % der gesamten Straßenlängen. Anhand der Änderung der gesamten Straßenlängen wurden ebenso fahrbahntragende Ingenieurbauwerke, Straßenmeistereien und fahrbahnbegleitende Infrastruktur (Schutzplanken, Leuchten usw.) skaliert.
- Durch den reduzierten Energiebedarf durch die Maßnahmen im Bereich Energieeinsparungen können fossile Erzeugungskapazitäten reduziert werden. In der Fallstudie wird jedoch davon abgesehen den Erzeugungsmix proportional zur Energieeinsparung zu reduzieren. Stattdessen wird nur die fossile Erzeugungsleistung (Stein- und Braunkohle) gemindert. Dies führt zum kompletten Ausstieg aus der Braunkohle und senkt die Erzeugungskapazitäten der Steinkohlekraftwerke um 66 %.

Weiterhin wurden Anpassungen bei den Wirkungsfaktoren der Indikatoren vorgenommen, um die Wirkungen, welche nicht direkt auf den Bestand wirken aber durchaus positive Effekte auf Ressourceninanspruchnahme haben abzubilden.

- Die Recyclingquote bezogen auf die Gesamtmenge an Asphalt wird bis 2030 auf 40 % und bis 2050 auf 75 % erhöht.
- Der Anteil von sekundärem Kupfer am Kupfermix wird bis 2030 mit 70 % und bis 2050 mit 90 % angenommen.
- Bis 2050 wird die Produktlebensdauer von IKT-Geräten um 50 % gesteigert, dies betrifft bei den technischen Infrastrukturen nur die Server. Weiterhin werden bis 2050 75 % der Edelmetalle im IKT-Bereich recycelt.

### 2.5.4 Präsentation der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

In der Fallstudie sind verschiedene Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz angelegt, die eine deutliche Senkung der Ressourceninanspruchnahme ausweisen. In den Berechnungen wurden der verstärkte Einsatz von Sekundärmaterialien (Kupfer und Asphalt), Erhöhung der Energieeffizienz (einhergehend mit einer Reduktion der Braunkohleverstromung), längere Nutzungsdauern der IKT-Infrastruktur sowie Umwidmung von Straßen für andere Nutzungszwecke operationalisiert.

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ sind in den folgenden Tabellen und Grafiken abgebildet. Dabei wird nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050 differenziert.

Tabelle 17: KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau- und Unterhalt | Verkehr | 101 | 95 | 83 | 270 | 231 | 178 | 11 | 11 | 10 |
| | IKT | 9 | 7 | 4 | 5 | 6 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 42 | 46 | 47 | 27 | 29 | 30 | 2 | 2 | 2 |
| | Energie | 43 | 45 | 43 | 89 | 121 | 128 | 6 | 8 | 8 |
| | ***Zwischensumme*** | **196** | **192** | **177** | **391** | **388** | **342** | **19** | **21** | **21** |
| Bau-aufwen-dungen | Verkehr | 4,2 | 1,8 | 0,5 | 54,5 | 35,8 | 11,5 | 5,5 | 3,2 | 0,8 |
| | IKT | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,35 | 0,54 | 0,77 | 0,03 | 0,04 | 0,06 |
| | Wasser/Abwasser | 0,14 | 0,07 | 0,03 | 1,95 | 1,52 | 0,76 | 0,19 | 0,13 | 0,06 |
| | Energie | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,91 | 0,57 | 0,46 | 0,08 | 0,04 | 0,03 |
| | ***Zwischensumme*** | **4,4** | **1,9** | **0,6** | **57,7** | **38,5** | **13,4** | **5,8** | **3,4** | **1,0** |
| Betrieb | Verkehr | 1,7 | 0,8 | 0,3 | 22,1 | 15,4 | 5,8 | 2,2 | 1,4 | 0,4 |
| | IKT | 5,4 | 3,4 | 1,0 | 69,2 | 69,2 | 23,2 | 7,1 | 6,2 | 1,7 |
| | Wasser/Abwasser | 3,1 | 1,0 | 0,2 | 39,8 | 21,3 | 5,4 | 4,1 | 1,9 | 0,4 |
| | Energie | 22,4 | 6,8 | 1,3 | 262,9 | 123,0 | 27,1 | 30,0 | 13,2 | 2,6 |
| | ***Zwischensumme*** | **33** | **12** | **3** | **394** | **229** | **61** | **43** | **23** | **5** |
| **Summe** | | **233** | **206** | **180** | **843** | **655** | **417** | **68** | **47** | **27** |
| *Nutzung[1)]* | *Kraftwerke (fossil)* | *243* | *78* | *16* | *3.112* | *1.595* | *382* | *341* | *161* | *33* |

[1)] **Hinweis***:* Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 18: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Sektor | Versiegelte Fläche in 1.000 ha | | |
|---|---|---|---|
| | 2012 | 2030 | 2050 |
| Verkehr | 479 | 504 | 506 |
| IKT | 0 | 0 | 0 |
| Wasser/Abwasser | 14 | 14 | 13 |
| Energie | 10 | 8 | 6 |
| **Summe** | **502** | **526** | **525** |
| | **Abweichung gegenüber dem Referenzszenario in 1.000 ha** | | |
| Verkehr | 0 | 0 | -6 |
| IKT | 0 | 0 | 0 |
| Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 |
| Energie | 0 | -1 | -2 |
| **Insgesamt** | **0** | **-1** | **-9** |

Quelle: Eigene Berechnung.

Tabelle 19: Abweichung KRA, KEA und THG in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ gegenüber dem Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050

| Bereich | Sektor | KRA in Mio. Tonnen/a | | | KEA in PJ/a | | | THG in Mio. Tonnen/a | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 | 2012 | 2030 | 2050 |
| Bau und Unterhalt | Verkehr | 0 | -13 | -26 | 0 | -54 | -112 | 0 | -1 | -2 |
| | IKT | 0 | -4 | -11 | 0 | -1 | -3 | 0 | -0,1 | -0,2 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Energie | 0 | -6 | -12 | 0 | -3 | -5 | 0 | 0 | 0 |
| | ***Zwischensumme*** | **0** | **-23** | **-50** | **0** | **-58** | **-120** | **0** | **-1** | **-2** |
| Bau-aufwen-dungen | Verkehr | 0 | -1,4 | -1,6 | 0 | -9,6 | -17,7 | 0 | -1,1 | -1,7 |
| | IKT | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | -0,05 | -0,05 | 0,0 | -0,3 | -0,6 | 0 | -0,03 | -0,06 |
| | Energie | 0 | -0,01 | -0,01 | 0,0 | -0,1 | -0,1 | 0 | -0,01 | -0,01 |
| | ***Zwischensumme*** | **0** | **-1,5** | **-1,7** | **0** | **-10,0** | **-18,4** | **0** | **-1,1** | **-1,8** |
| Betrieb | Verkehr | 0 | -0,6 | -0,7 | 0 | -3,9 | -7,6 | 0 | -0,4 | -0,7 |
| | IKT | 0 | -3,6 | -6,3 | 0 | -29,6 | -73,0 | 0 | -3,1 | -6,8 |
| | Wasser/Abwasser | 0 | -0,9 | -1,0 | 0 | -6,1 | -10,4 | 0 | -0,7 | -1,0 |
| | Energie | 0 | -8,8 | -8,7 | 0 | -78,0 | -100,1 | 0 | -8,3 | -10,1 |
| | ***Zwischensumme*** | **0** | **-14** | **-17** | **0** | **-118** | **-191** | **0** | **-12** | **-19** |
| **Summe** | | **0** | **-38** | **-68** | **0** | **-185** | **-329** | **0** | **-15** | **-22** |
| *Nutzung[1)]* | *Kraftwerke (fossil)* | *0* | *-92* | *-90* | *0* | *-816* | *-1.032* | *0* | *-86* | *-104* |

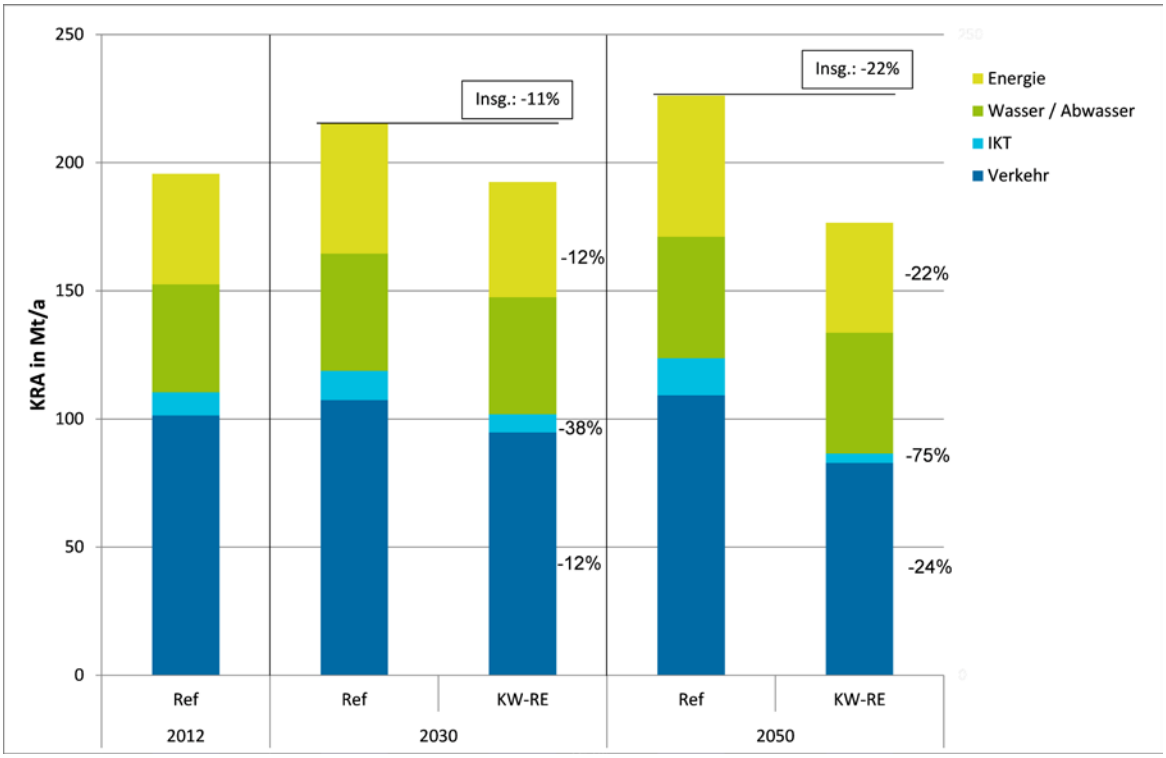
[1)] **Hinweis***:* Anteilig ist die Nutzung bereits in den Bauauswendungen und dem Betrieb enthalten!

Quelle: Eigene Berechnung.

Zur besseren Darstellung werden im Weiteren nicht die absoluten Beträge in den einzelnen Infrastrukturbereichen ausgewiesen, sondern lediglich die Differenz gegenüber dem Referenzszenario.

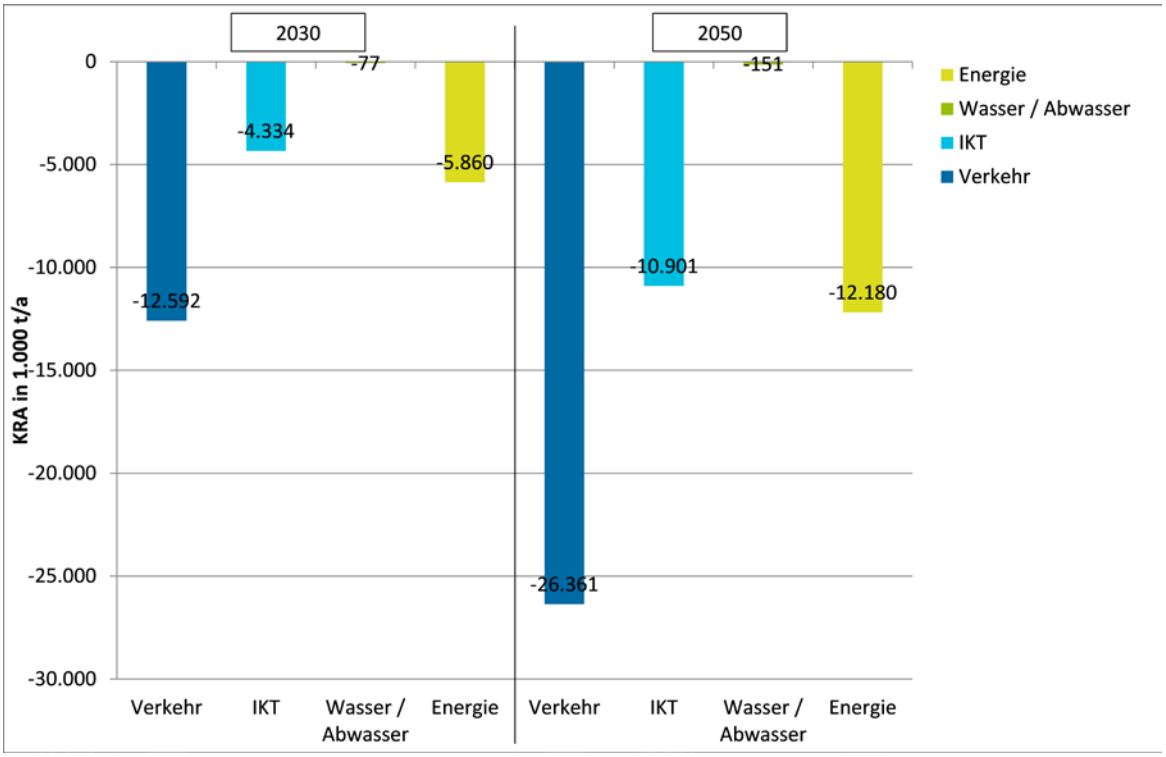
Der **KRA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur verringert sich in dieser Fallstudie bis zum Jahr 2050 insgesamt um 22 % gegenüber dem Referenzszenario. Am deutlichsten sinkt der KRA des IKT-Sektors aufgrund höherer Lebensdauern der Komponenten und dem Einsatz von Recyclingmaterial. Insgesamt liegt der KRA rund 11 Mio. t/a unter dem Referenzszenario (-75 %). Der KRA der Verkehrsinfrastruktur liegt 24 % bzw. rund 26 Mio. t/a unter dem Referenzszenario. Mit einer Reduktion von rund 12 Mio. t/a liegt der KRA der Energieversorgungsinfrastruktur in dieser Fallstudie im Jahr 2050 22 % unter dem Referenzszenario. Dagegen fällt der Rückgang bei der Wasser- und Abwasserversorgungsinfrastruktur mit rund 151.000 t/a marginal aus (vgl. Abbildung 95).

Abbildung 95: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 96: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz"; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050

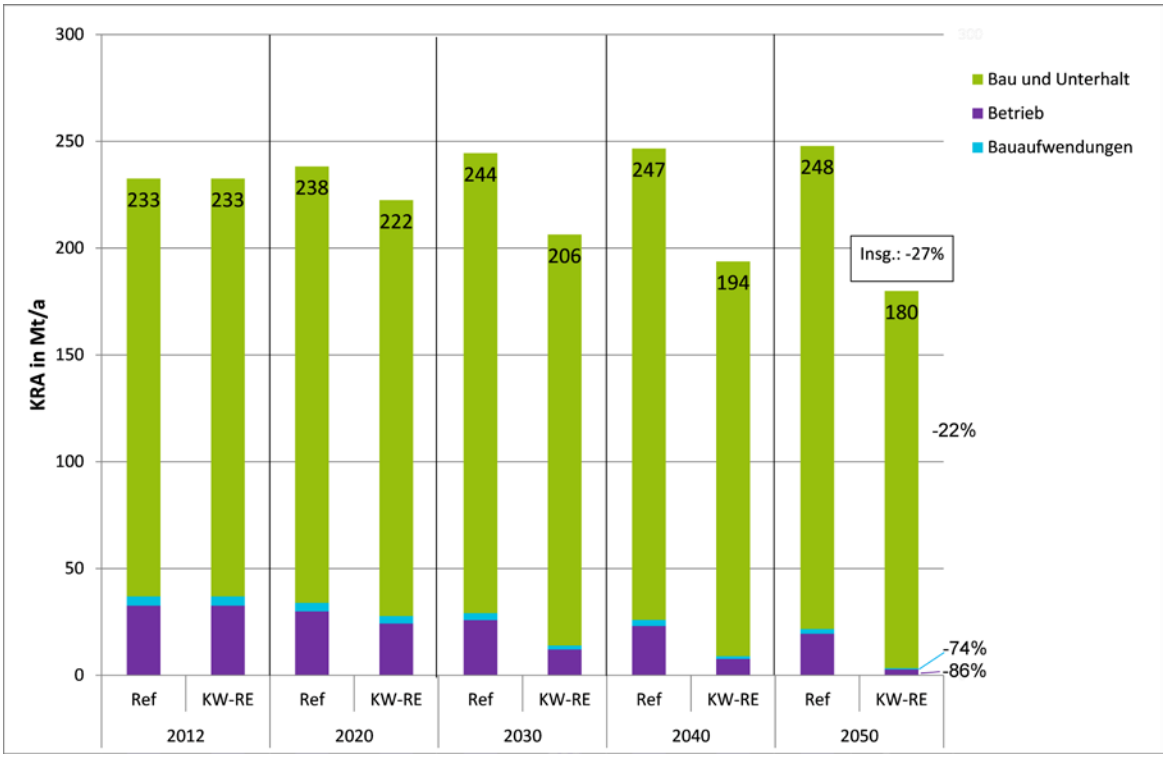



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Werden neben dem Bau und Unterhalt der Infrastruktur auch die Bauaufwendungen und der Betrieb der Infrastruktur mit einbezogen liegt der KRA in der Fallstudie im Jahr 2050 insgesamt 68 Mt/a bzw. 27 % unter dem Referenzszenario. Davon entfallen rund 50 Mt/a auf den Bau und Unterhalt, 17 Mt/a auf den Betrieb und rund 2 Mt/a auf die Bauaufwendungen (vgl. Abbildung 97). Der Rückgang des KRA gegenüber dem Referenzszenario beim Betrieb und den Bauaufwendungen erklärt sich durch den geringeren Bestand an fossilen Erzeugungsanlagen aufgrund der in der Fallstudie angesetzten Erhöhung der Energieeffizienz. Dadurch ergibt sich ein niedriger Emissionsfaktor, welcher dort in den Berechnungen veranschlagt wird.

Besonders deutlich wird dieser Effekt wenn die sich außerhalb der Systemgrenzen befindliche Nutzung (Nettostromerzeugung fossiler Erzeugungsanlagen) mit in die Betrachtung einbezogen wird. Der KRA aus der Nutzung liegt in der Fallstudie im Jahr 2050 mit rund 16 Mt/a rund 85 % unter dem Referenzszenario (106 Mt/a). Unter Einbezug der Nutzung liegt der KRA insgesamt im Jahr 2050 sogar um rund 45 % unter dem Referenzszenario.

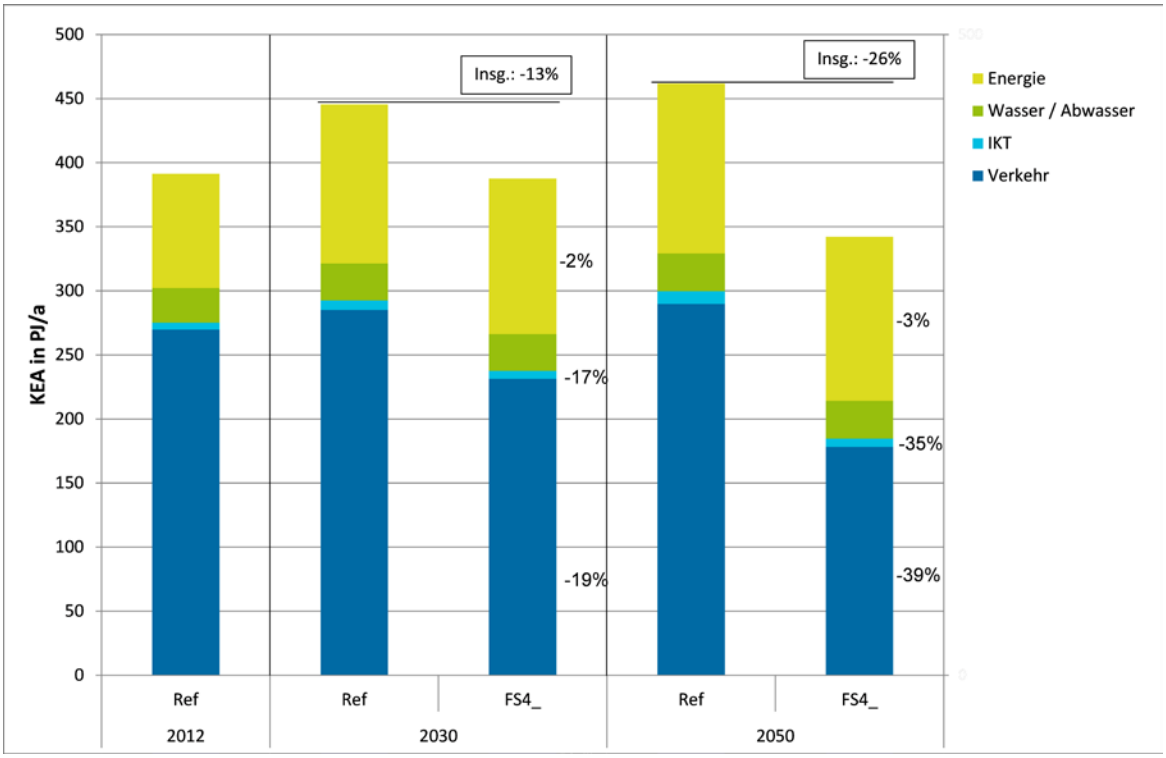
Abbildung 97: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

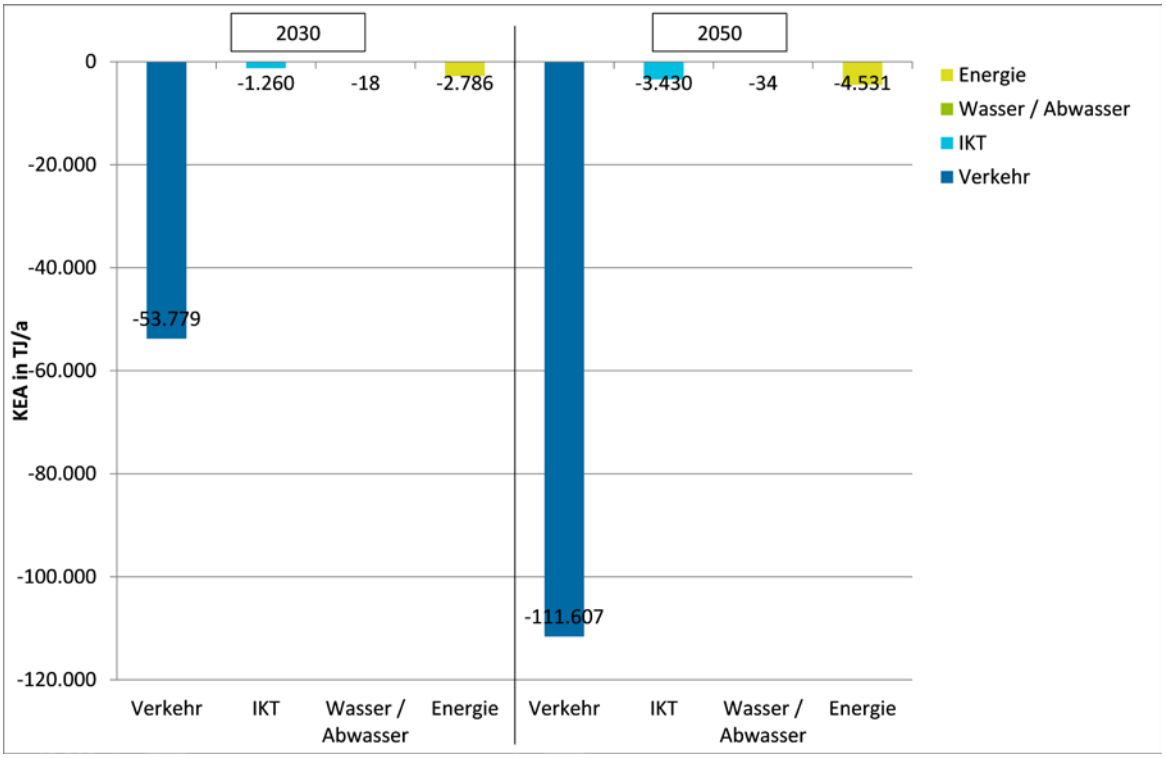
Der **KEA** durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur liegt in der Fallstudie im Jahr 2050 insgesamt 26 % unter dem Referenzszenario. Auch hier wird der größte Effekt bei der Verkehrsinfrastruktur mit -39 % erzielt. Der durch den IKT-Sektor verursachte KEA liegt hingegen nur um 35 % unter dem Referenzszenario. Absolut liegt der KEA rund 112 Mio. PJ/a (Verkehrssektor), 4,5 PJ/a (Energieversorgung) und 3,4 PJ/a niedriger als im Referenzszenario (vgl. Abbildung 98 und Abbildung 99).

Abbildung 98: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 99: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050

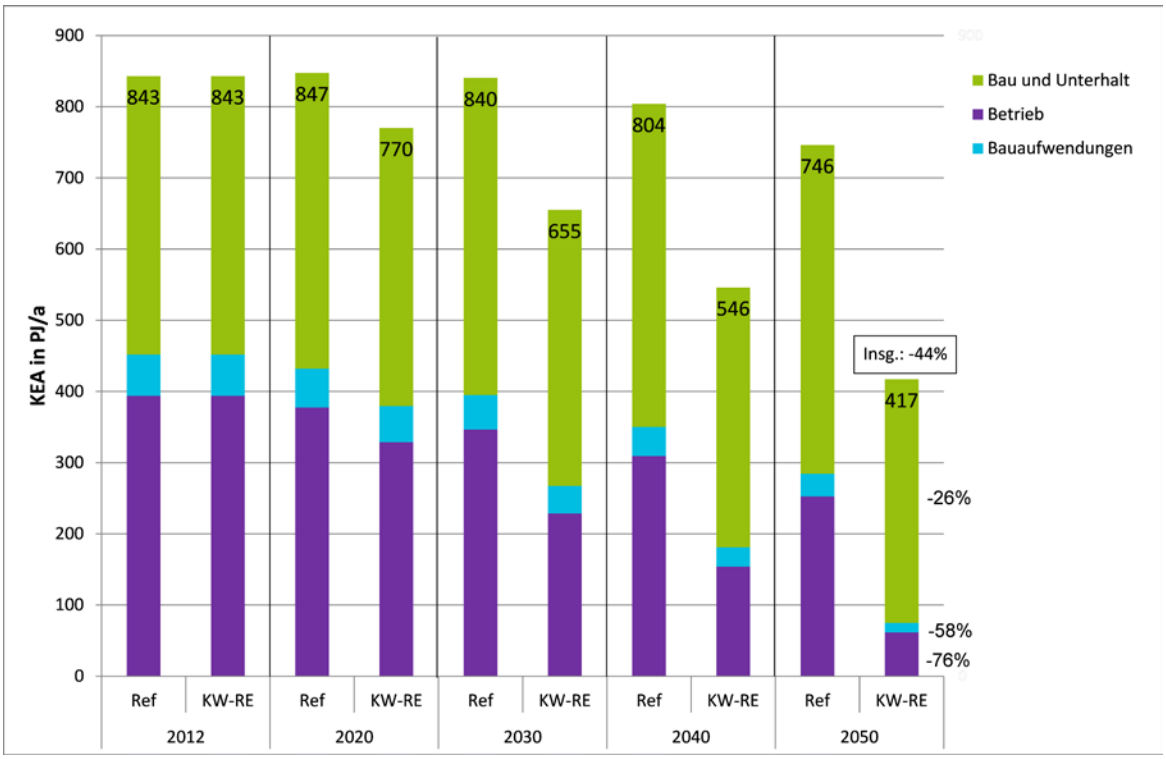



Quelle: Difu/Öko-Institut.

Der KEA durch die Bauaufwendungen liegt im Jahr 2050 in der Fallstudie 58 % bzw. 18 PJ/a und durch den Betrieb der Infrastruktur um 76 % bzw. 191 PJ/a unter dem Referenzszenario. Hier kommt derselbe Effekt wie beim KRA zum Tragen, ein Rückgang an fossilen Stromerzeugungsanlagen (Abbildung 100).

Würde die Nutzung der fossilen Erzeugungsanlagen (mit der Nettostromerzeugung verbundene fossile Energieträger) mit in die Betrachtung einbezogen würde der KEA in 2050 sogar um 63 % unter dem Referenzszenario liegen. Damit wird deutlich, dass die Nutzung der Infrastruktur einen größeren Effekt auf die Ressourcenleichtigkeit besitzen kann als die Infrastruktur an sich.

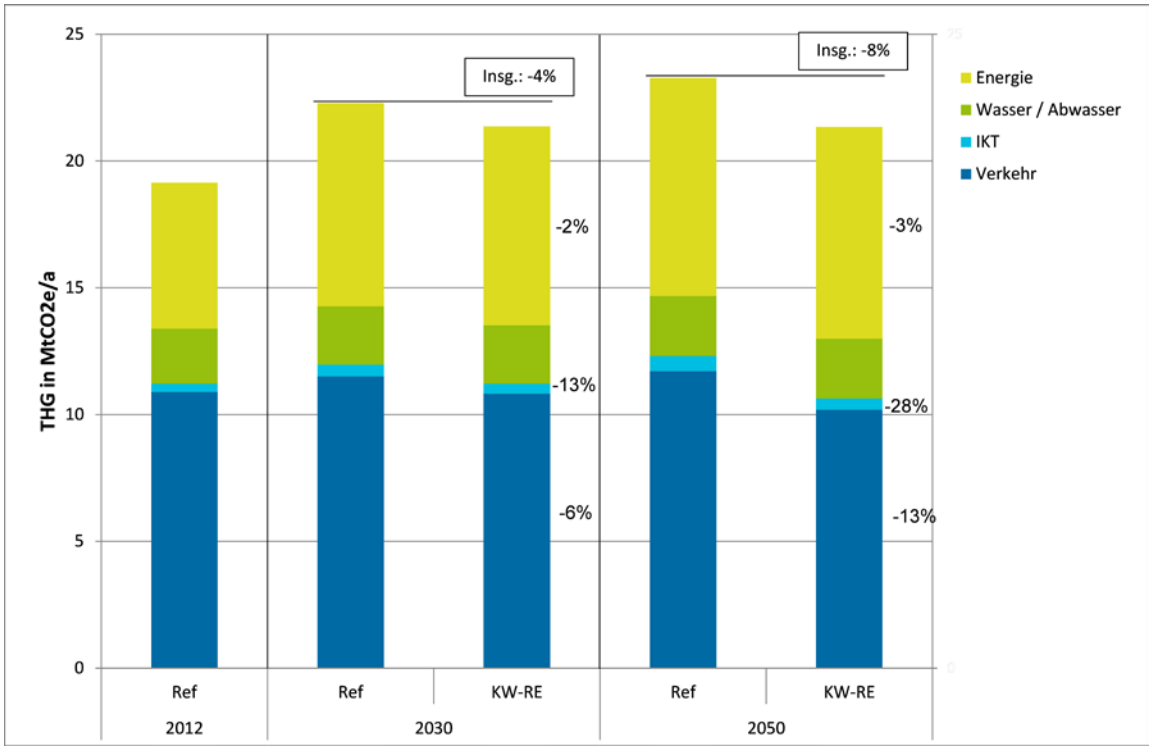
Abbildung 100: Kumulierter Energieaufwand durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

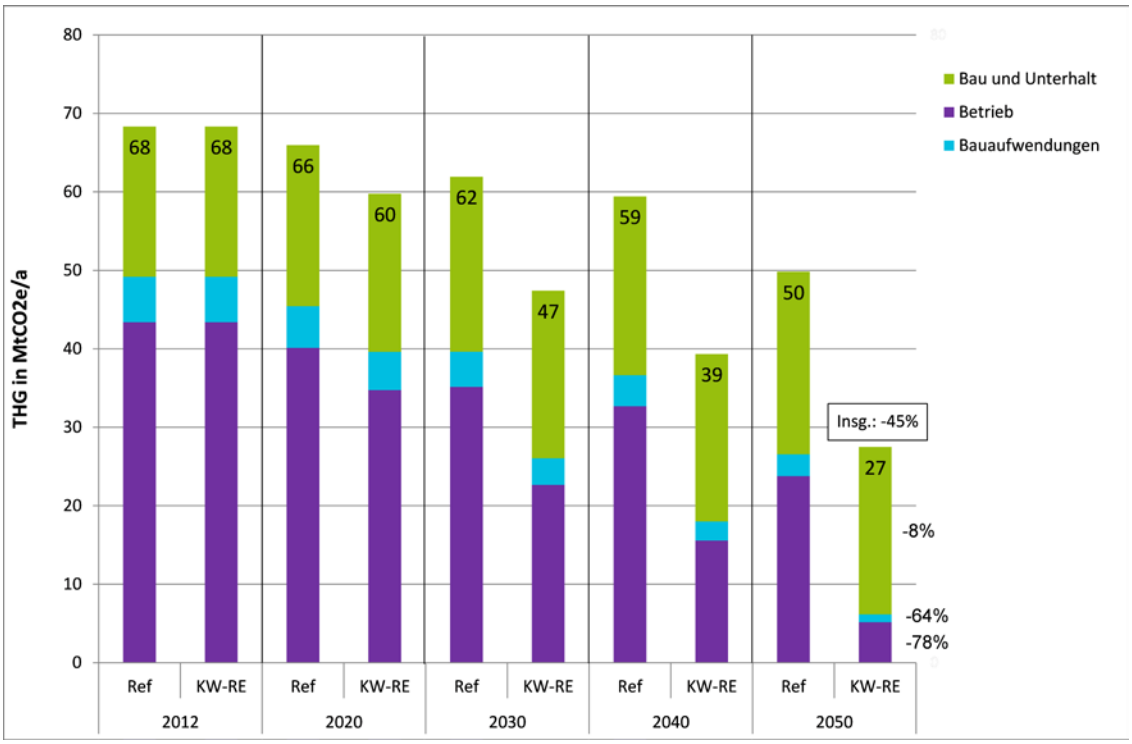
Bei den **THG-**Emissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur fallen die Emissionen durch die Energieinfrastrukturen um 3 %, durch den IKT-Sektor um 28 % und durch die Verkehrsinfrastruktur um 13 % im Jahr 2050 verglichen mit dem Referenzszenario. Dabei entstehen 259.000 t $CO_2$ äq/a an Einsparungen (Energiesektor), 170.000 t $CO_2$ äq/a (IKT) und 1,5 Mio. t/a (Verkehr) (vgl. Abbildung 101 und Abbildung 102).

Abbildung 101: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

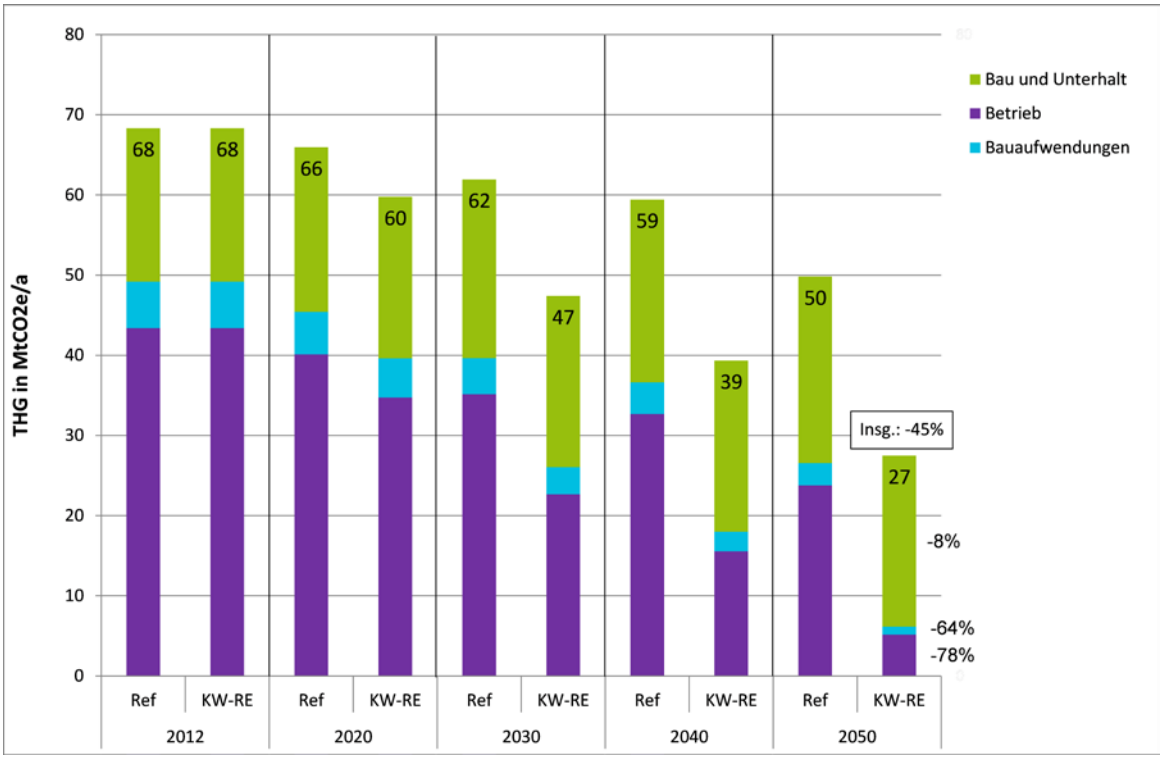
Abbildung 102: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Während die THG-Emissionen aus Bau und Unterhalt um rund 1,9 Millionen Tonnen $CO_2$-Äquivalente unter dem Referenzszenario (2050) liegen, liegen die durch die Bauaufwendungen um 1,8 Millionen Tonnen (-64 %) und die durch den Betrieb der Infrastruktur um rund 19 Millionen Tonnen darunter (-78 %). Insgesamt führt das Fallbeispiel zu einer Reduktion der Emissionen im Jahr 2050 um 45 % auf nur noch 27 Millionen Tonnen (vgl. Abbildung 103).

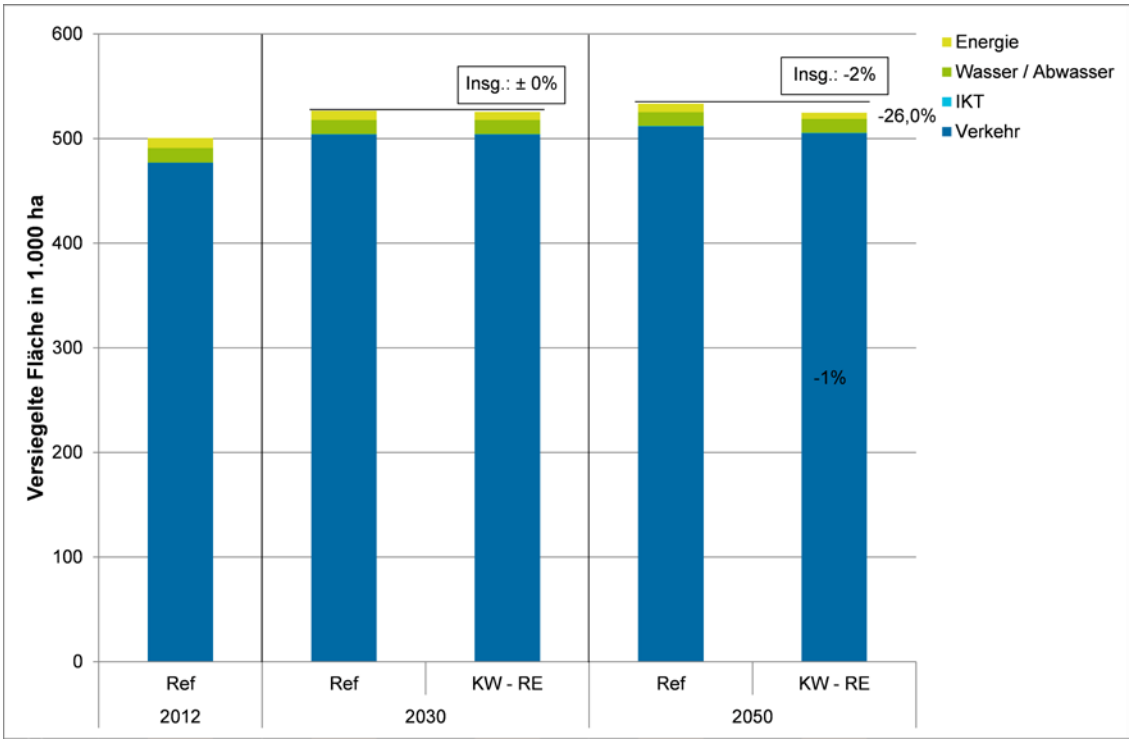
Abbildung 103: Treibhausgasemissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

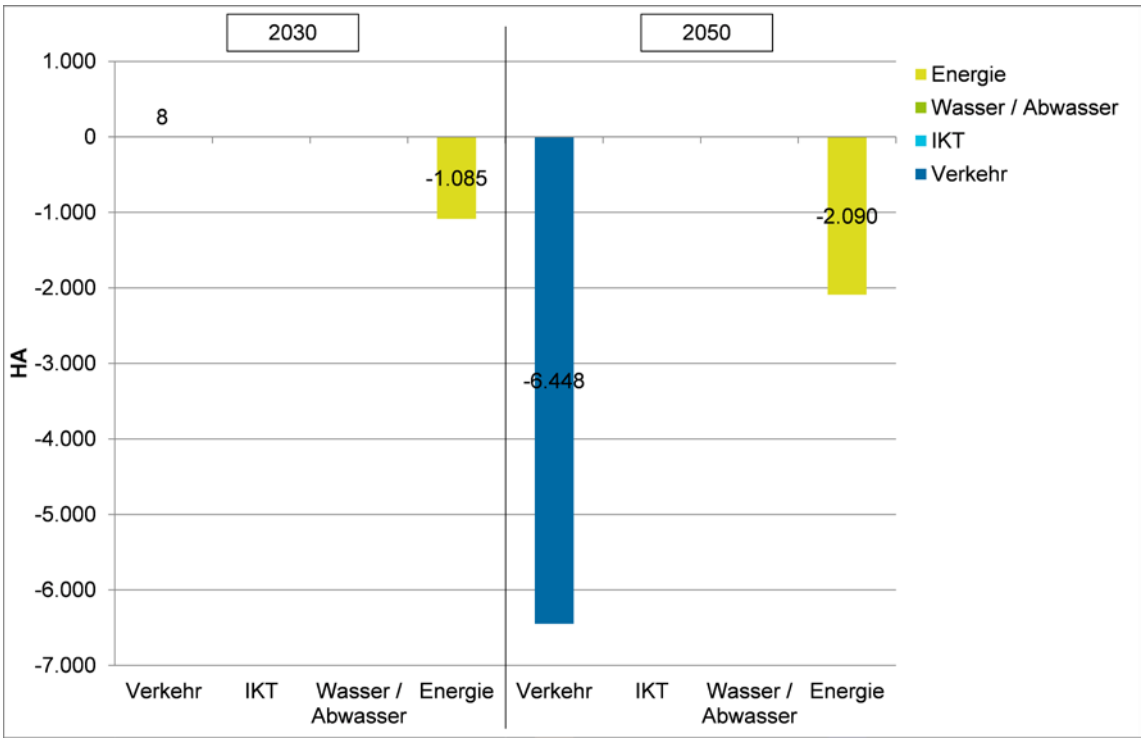
Die Minderung der **Flächeninanspruchnahme** (versiegelte Fläche) gegenüber dem Referenzszenario nimmt dabei deutlich weniger stark ab als die anderen Indikatoren. Insgesamt liegt diese im Jahr 2050 in dieser Fallstudie rund 2 % unter dem Referenzszenario. Es werden im Jahr 2050 rund 8.500 ha weniger als im Referenzszenario in Anspruch genommen, wobei der Großteil davon mit rund drei Vierteln auf die Verkehrsinfrastruktur entfällt (vgl. Abbildung 104 und Abbildung 105).

Abbildung 104: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ im Vergleich zum Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

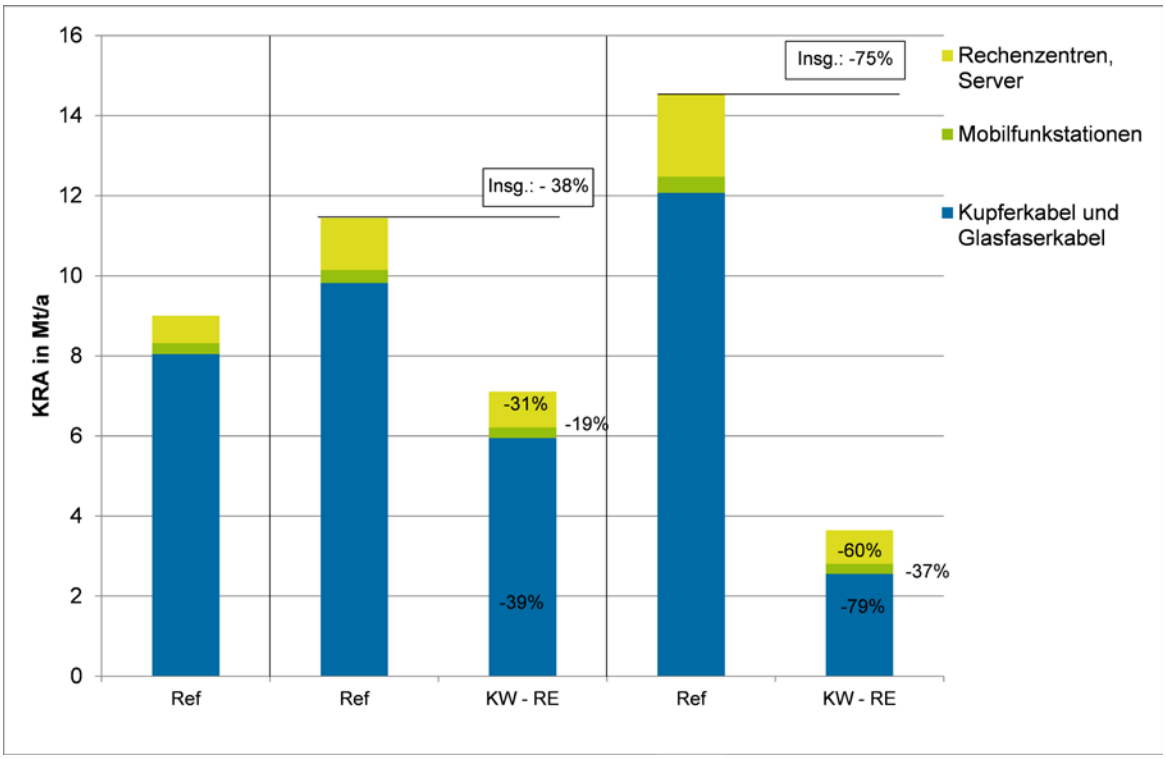
Abbildung 105: Versiegelte Fläche in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Differenz gegenüber dem Referenzszenario nach Infrastrukturbereich für die Jahre 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die Detailbetrachtungen des KRA der IKT-Infrastruktur in Abbildung 106 zeigen, dass im Jahr 2050 allen betrachteten Bereichen der IKT in dieser Fallstudie gegenüber dem Referenzszenario deutlich niedriger ausfallen. Den größten Einfluss besitzt die Verwendung von Sekundärmaterial für Kupferkabel. In Einer Szenarette wird in Kapitel 3.3.4 untersucht, wie sich ein verstärkter Ausbau mittels Glasfaser auf die Ergebnisse auswirkt.

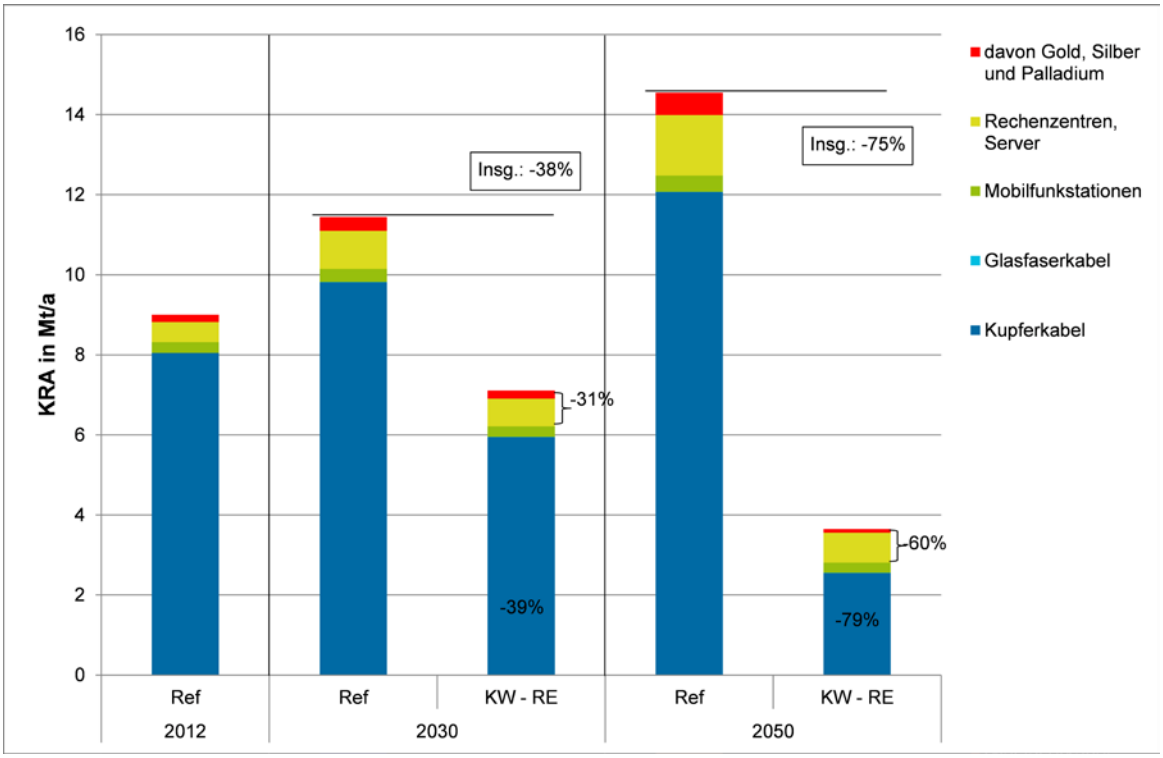
Abbildung 106: Kumulierter Rohstoffaufwand durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ für die IKT-Infrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Da im IKT-Sektor viele seltene Rohstoffe (Metalle) zum Einsatz kommen, deren Gewinnung mit einer Reihe an Umweltfolgen verbunden sind, sind diese in der folgenden Abbildung gesondert ausgewiesen. Rot dargestellt wurden hier Silber, Gold und Palladium als Teil der Rechenzentren. Während im Jahr 2050 der KRA der Rechenzentren in der Fallstudie 60 % unter dem Referenzszenario liegt, verringert sich das KRA von Gold, Silber und Palladium um 83 %.

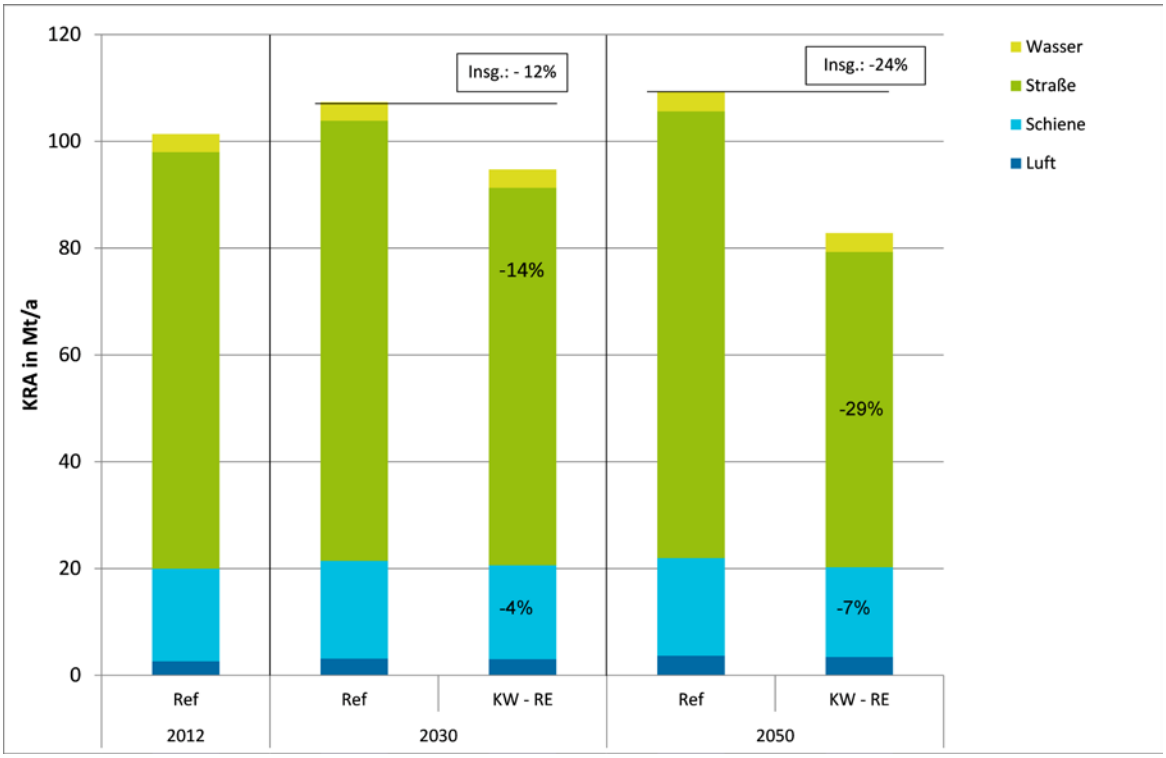
Abbildung 107: Einsatz kritischer Metalle bei Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ für die IKT-Infrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die vertiefende Betrachtung des Verkehrssektors verdeutlicht den großen Effekt der Infrastruktur des Straßenverkehrs. Im Jahr 2050 liegt der KRA in dieser Fallstudie in diesem Bereich 29 % unter dem Referenzszenario (vgl. Abbildung 108). Ursächlich dafür ist neben dem Rückbau von Straßen insbesondere der verstärkte Einsatz von Recyclingasphalt.

Abbildung 108: Kumulierter Rohstoffbedarf durch Bau und Unterhalt der Infrastruktur in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ für die Verkehrsinfrastruktur im Detail im Vergleich zum Referenzszenario für die Jahre 2012, 2030 und 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.5.5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse

In der Fallstudie wurden verschiedene Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz aufgezeigt, die eine deutliche Senkung der Ressourceninanspruchnahme ausweisen. Unter Berücksichtigung von Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur verändern sich die Parameter KRA, KEA, THG und Flächeninanspruchnahme in dieser Fallstudie am deutlichsten gegenüber dem Referenzszenario.

Insgesamt ergeben sich gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 folgende Minderungen:

- KRA: -27 %,
- KEA: -44 %,
- THG: -45 % und
- Versiegelte Fläche: -2 %.

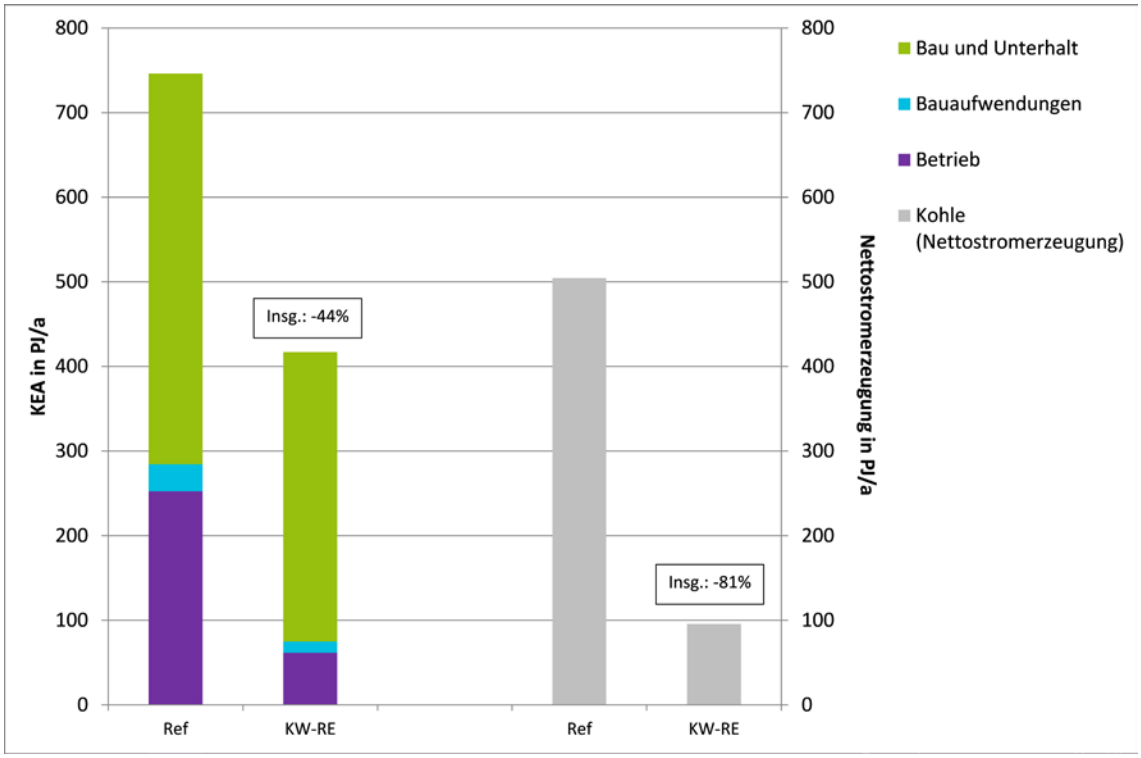
Die Fallstudie zeigt, dass es hinsichtlich der betrachteten Parameter KRA, KEA und THG-Emissionen von hoher Relevanz ist, zukünftig den Einsatz von Recyclingmaterialien und Baustoffen zu forcieren und lebensdauerverlängernde Maßnahmen umzusetzen. Insbesondere der Einsatz von Recyclingasphalt im Straßenbau hat aufgrund des hohen Materialflusses dabei einen großen Effekt. Im Unterschied zu den anderen Fallstudie, die sich überwiegend nur in der Länge des zugebauten Straßennetzes unterscheiden, wirkt der Einsatz von Recyclingasphalt auf Großteile des Bestandes, welcher kontinuierlich erneuert werden muss und ist aus diesem Grund besonders wirkmächtig.

Weiterhin bringt die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, wenn bei im Vergleich zum Referenzszenario gleichbleibendem Ausbaupfad der Erneuerbaren Erzeugungsanlagen der Bestand an Kohlekraftwerken geringer ausfällt, große Potenziale für eine ressourcenleichte Infrastruktur mit sich.

Im den Ergebnissen in Kapitel 2.5.4 ist der Kraftwerksbetrieb (Stromerzeugung) nicht enthalten. Durch die Reduktion des Bestandes an fossilen Erzeugungsanlagen kommt es neben den dargestellten Minderungen bei KRA, KEA und THG durch die Erzeugungsanlagen in dieser Fallstudie durch Energieeffizienzmaßnahmen und der Substitution von fossilen Erzeugungsanlagen (Braun- und Steinkohle) zu weiteren Einsparungen in der Nutzungsphase der Anlagen.

In Abbildung 109 werden die Reduktionen des KEAs durch die Maßnahmen der Fallstudie dargestellt. Gegenübergestellt wird die Reduktion der Nettostromerzeugung aus Braun- und Steinkohlekraftwerken durch Energieeffizienzmaßnahmen. Man sieht, dass die Nettostromerzeugung deutlich stärker zurückgeht als der jährliche KEA. Bei der Darstellung ist darauf zu achten, dass trotz gleicher Einheiten andere Bezugsgrößen nebeneinander gestellt sind, welche nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind. Auch sind grundsätzlich die Maßnahmen, durch welche die unterstellte Energieeffizienz erreicht wird nicht umfassend erfasst.

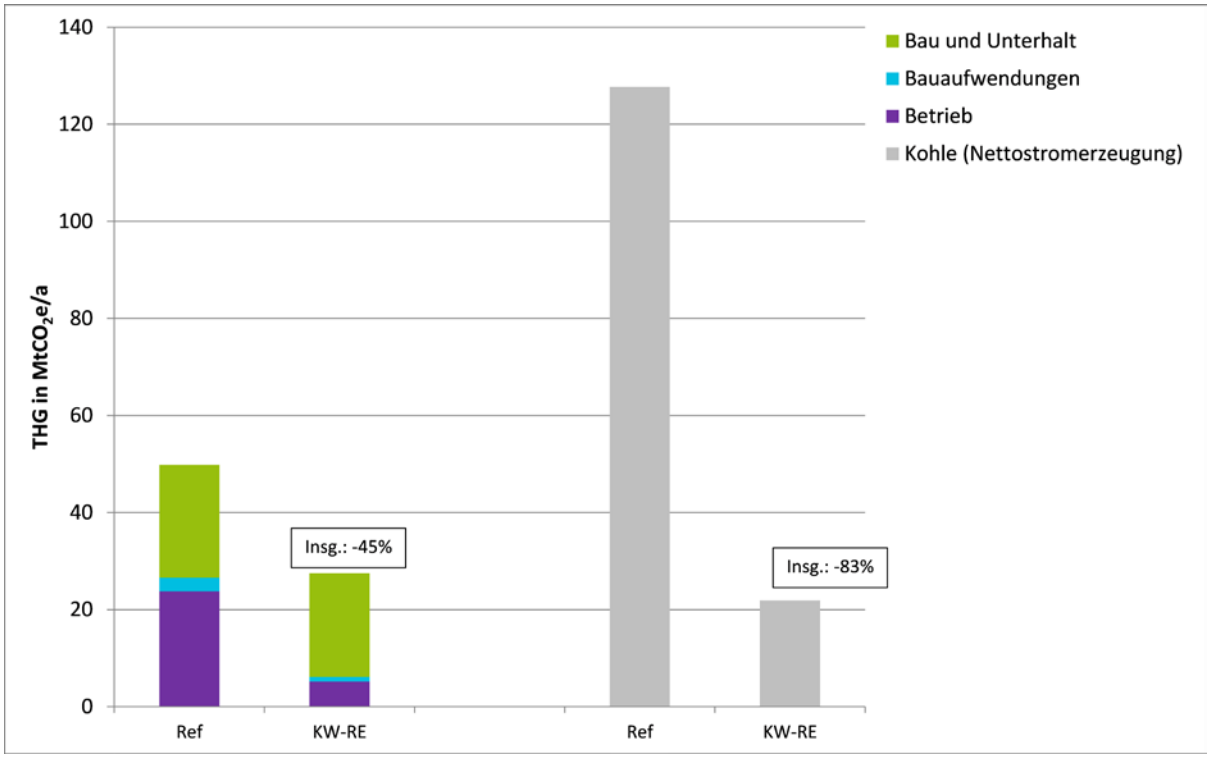
Abbildung 109: Gegenüberstellung der Reduktion des KEA durch Bau, Unterhalt Bauaufwendungen und Betrieb Infrastrukturen und der Nettostromerzeugung durch Kohle im Jahr 2050 in dem Fallbeispiel „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ und dem Referenzszenario




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die resultierende Reduktion der THG-Emissionen ist in Abbildung 110 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Wirkung durch die Reduktion des Energiebedarfs, welche einen geringeren Kraftwerkspark aber auch weniger fossile Energiebereitstellung impliziert, zu größeren Einsparungen bei der Stromerzeugung als im Bestand der technischen Infrastrukturen hat. Die gesamten Maßnahmen der Fallstudie 4 bewirken eine Reduktion von 22 Mt $CO_2$ äq oder 45 % der jährlichen THG-Emissionen. Im Vergleich führt die geringere Energiebereitstellung durch Kohlekraftwerke zu einer Einsparung von 106 Mt $CO_2$ äq oder 83 %. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Aufwendungen zur Umsetzung der Energieeffizienz bei weitem nicht umfassend in den Systemgrenzen abgebildet werden kann.

Abbildung 110: Gegenüberstellung der Reduktion der THG-Emissionen durch Bau, Unterhalt Bauaufwendungen und Betrieb Infrastrukturen und durch die Nettostromerzeugung durch Kohle im Jahr 2050 in dem Fallbeispiel „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“ und dem Referenzszenario



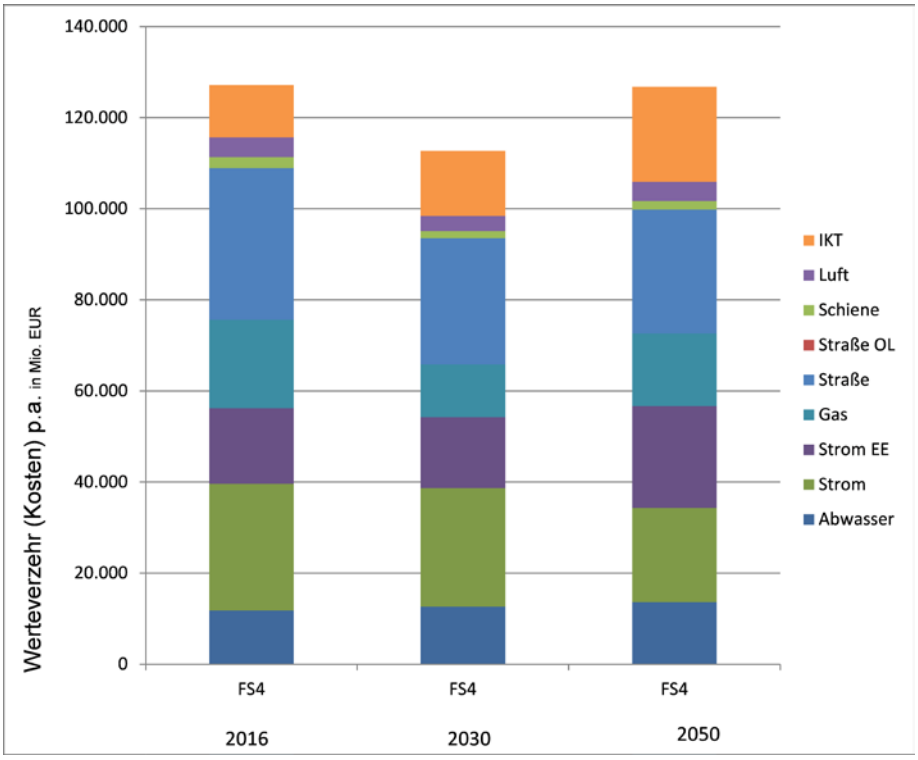

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Der Einsatz von Recycling-Kupfer in der IKT-Infrastruktur bietet zwar die Möglichkeit die Ressourceninanspruchnahme zu reduzieren, mit der Substitution von Kupfer durch alternative Technologien bzw. Materialien lassen sich weitere Potenziale erschließen. Die Verwendung von Glasfaserkabeln ist beispielsweise mit einer geringeren Ressourceninanspruchnahme verbunden und wird in einer Szenarette in Kapitel 3.3.4 Endbericht genauer analysiert.

**Abschätzung der Kostenentwicklung in der Fallstudie**

Aufgrund der in der Fallstudie zugrunde gelegten Annahmen zu Anpassungen der Infrastruktur ergeben sich gegenüber dem Referenzszenario lediglich geringe Veränderungen bei den Kapitalkosten. Ein geringerer Ausbau der Straßeninfrastruktur sowie eine etwas stärkere Reduzierung der konventionellen Stromerzeugung gegenüber dem Referenzszenario führen zwar zu niedrigeren Kosten, die jedoch gemessen am Gesamtvolumen kaum ins Gewicht fallen. Auch hier bleibt es deshalb bei der grundsätzlichen Einschätzung einer stabilen Kostenentwicklung (vgl. Abbildung 90).

Abbildung 111: Kapitalkosten in der Fallstudie 4 „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 2.5.6 Diskussion qualitativer Kriterien zur Einschätzung der Fallstudie

Die Bewertung der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ in Bezug auf die qualitativen Kriterien unterschiedet sich dahingehend von den anderen Fallstudien, als dass es sich in diesem Fall nicht um ein konsistentes Gerüst an gekoppelten Maßnahmen handelt, sondern vielmehr um eine Reihe von Einzelmaßnahmen[89]. Die Bewertung bezieht sich damit auf einzelne Maßnahmen, welche in der Fallstudie angelegt sind. Und es werden nur diejenigen Maßnahmen diskutiert und bewertet, bei denen das jeweilige Kriterium berührt ist. Auf eine zusammenfassende Bewertung wird somit für diese Fallstudie verzichtet. Weiterhin wird das Kriterium der Teilhabe für alle in der Fallstudie operationalisierten Maßnahmen als nicht relevant eingestuft und damit nicht weiter betrachtet.

Für die Einschätzung des **gesellschaftlichen Akzeptanz** der in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ angelegten *Umwidmung von Straßen*, welche zu einer geringen Verringerung der Netzlänge führt, sollte unterschieden werden zwischen direkt betroffenen Anwohnern, welche dadurch ggf. von Reisezeitverlängerung betroffen sind und nicht oder kaum betroffenen Bürgerinnen und Bürgern. Während die Allgemeinheit davon profitiert, dass die finanziellen Aufwendungen für das Gesamtsystem Straße durch die ersparten Aufwendungen für die Instandhaltung der umgewidmeten Straßen zurückgehen, dürfte die Akzeptanz bei direkt betroffenen Bürgerinnen und Bürgern eher geringer ausfallen. Insgesamt kann es als fraglich eingeschätzt werden, dass die Bürgerinnen die finanziellen Vorteile tatsächlich wahrnehmen. Zudem dürfte die Akzeptanz von verschiedenen Lebensstilen abhängen. Pkw-affine Bürger dürften dieser Maßnahme eine geringere Akzeptanz entgegenbringen als

89 Auch ist an dieser Stelle hervor zu heben, dass eine Kopplung mit dem Sektor der Abfallwirtschaft nicht Teil der weiteren Ausführungen ist, obwohl der Titel der Fallstudie („Kreislaufwirtschaft“) dies möglicherweise suggeriert und z. B. der Einsatz von Biomethan aus Reststoffen im Straßenverkehr denkbar wäre.

Nutzer des öffentlichen Verkehrs. Insgesamt dürfte diese Maßnahme der gesellschaftlichen Akzeptanz der Fallstudie im Vergleich zum Referenzszenario eher nicht förderlich sein.

Für den *Einsatz von Sekundärmaterialien* ist hingegen eine hohe Akzeptanz zu erwarten, solange die Kosten und Nutzungseigenschaften von Produkten und Infrastrukturkomponenten mit denen aus Primärmaterial vergleichbar sind, da die Nutzung von Recyclingmaterial als ökologisch vorteilhaft wahrgenommen wird. Ähnliches gilt für ein verstärktes *Ökodesign*. Bürgerinnen und Bürger würden direkt durch höhere Lebensdauern und Reparaturfähigkeit von Produkten profitieren, wobei nicht auszuschließen ist, dass andere Anforderungen an Produkte wie z. B. Design oder die Bewertung als Statussymbol überwiegen und Produkte trotz Ökodesign in kurzen Zyklen ausgetauscht werden. Für die in der Fallstudie operationalisierten Rechenzentrumskomponenten (Server) dürften letztgenannte Anforderungen jedoch weniger ausschlaggebend sein.

Die in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ angelegte *Umwidmung von Straßen* baut geringfügig und lokal begrenzt Redundanzen im Straßennetz ab. Dies könnte in einem beschränkten Maße die **Resilienz** der Straßenverkehrsinfrastruktur verringern. Im Falle von Störereignissen stehen dann lokal weniger Alternativstrecken zur Verfügung. In Hinblick auf den Einsatz von Sekundärmaterialien ergibt sich in der Nutzung kein Einfluss auf die Resilienz, sofern die Materialeigenschaften mit denen von Primärmaterialien vergleichbar sind. Durch die Wiederverwertung sinkt jedoch die Abhängigkeit von Importen gegenüber dem Referenzszenario. Dies gilt z. B. für Rohölimporte (Asphalt) oder Stoffe mit einer geringen Anzahl an Förderstätten (z. B. seltene Erden). In Hinblick auf die Versorgungssicherheit kann deshalb die Fallstudie in Bezug auf die Resilienz positiv bewertet werden.

Ebenfalls als positiv einzustufen ist die Maßnahme einer *modularen Bauweise*. Bei Störfällen bzw. Beschädigungen könnte eine Instandsetzung in den Ausgangszustandes einfacher umgesetzt werden.

Für die Bewertung der **Flexibilität** können für die Fallstudie folgende Argumente aufgeführt werden. Durch die Maßnahme einer *modularen Bauweise* im Rahmen von Ökodesign besteht eine Upgradefähigkeit. D.h. auf eine veränderte Nachfrage nach oder Anforderungen an Infrastrukturdienstleistung (z. B. zunehmende Verkehr auf Brückenbauwerken, höhere Anforderungen an Serverinfrastruktur) kann durch Anpassungen gegenüber dem Referenzszenario einfacher reagiert werden. Dies kann als förderlich für die Flexibilität der Infrastruktur in der Fallstudie gesehen werden. Andererseits bedarf es dafür einer Ausarbeitung von Richtlinien und der Normierung für standardisierte Bauformen. Werden konkrete Anforderungen in solchen Richtlinien verankert, besteht jedoch das Risiko, dass diese Normierungen unter veränderten Rahmen- bzw. anderen Kontextbedingungen nicht passfähig sind und damit Flexibilität verloren geht, wenn nicht aus dem vollen Repertoire an Modulen geschöpft werden kann.

In Hinblick auf potenzielle Umweltfolgen kann die Fallstudie als förderlich bewertet werden. Dies ist insbesondere darin begründet, dass durch die in der Fallstudie operationalisierte höhere Lebensdauer, Reparaturfähigkeit und Upgradefähigkeit (*Ökodesign*) sowie dem *Einsatz von Sekundärmaterialien* im Vergleich zum Referenzszenario eine geringere Menge an Primärrohstoffen benötigt wird. Damit sinken auch die bei deren Abbau und Aufbereitung verursachten Umweltbelastungen entsprechend.

# 3 Vertiefende Untersuchung der Fallstudien

In den vorherigen Kapiteln wurden die vier Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen mit Blick auf ihre Ressourceninanspruchnahme (orientierende Stoffstromanalyse für KRA, KEA, THG und Fläche), Kostenentwicklungen und mögliche Auswirkungen auf qualitative Kriterien untersucht. Ebenso wurden die Rahmenbedingungen, Veränderungsprozesse und wesentlichen Parameter (z. B. Treiber) für die Weiterentwicklung bestehender Infrastrukturen und für den Einsatz alternativer Infrastrukturen herausgearbeitet (vgl. Teil B). Um fundierte Empfehlungen zur Gestaltung und Weiterentwicklung ressourcenleichter Infrastrukturen ableiten zu können, sind weitere, vertiefende Untersuchungen zielführend, die im Folgenden diskutiert werden. Entsprechend ist den **Hemmnissen** (Teil C Kapitel 3.1) einer Weiterentwicklung oder gar eines grundlegenden Systemwechsels der Infrastrukturen dezidiert nachzugehen. Da Infrastrukturen über lange Nutzungs- und Abschreibungszeiträume verfügen und somit entsprechende technisch-ökonomische Pfadabhängigkeiten bestehen, ist es wichtig, für die Systemanpassung bzw. -weiterentwicklung günstige **Zeitfenster** zu identifizieren.

Über diese Fragen hinaus werden **Sensitivitätsanalysen** (Teil C Kapitel 3.2) für zentrale Annahmen und Komponenten in den Wirkungsgefügen der Fallstudien berechnet und **Szenaretten** (Teil C Kapitel 3.3) für Kombinationen der Fallstudien bzw. anderer Zuschnitte derselben modelliert. Damit können nicht nur Annahmen überprüft, sondern auch Schlüsselelemente für die Gestaltung und Weiterentwicklung ressourcenleichter Infrastrukturen identifiziert werden.

## 3.1 Hemmnisse der Anpassung und Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme in den Szenarien

Die Leitfrage, der in diesem Kapitel nachgegangen wird, lautet: Welche Hemmnisse gibt es für die Weiterentwicklung bzw. einen Systemwechsel der im Vorhaben untersuchten Infrastruktursysteme?

Die Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen im Vorhaben RELIS bauen alle auf einer Weiterentwicklung der bestehenden Infrastruktursysteme auf. Auch wenn dabei nicht zwingend vom Konzept einer „Transformation“ ausgegangen werden muss, sind doch zum Teil signifikante technische und institutionelle Weiterentwicklungen des Bestehenden nötig. Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalysen mit ihren insgesamt für Bau und Betrieb eher marginalen Veränderungen der Ressourceninanspruchnahme können auch dahingehend interpretiert werden, dass eine signifikante Reduktion der Ressourceninanspruchnahme durch eine inkrementelle Anpassung und weitere Optimierung der Infrastrukturen nicht möglich ist. Der Betrieb und insbesondere die Nutzung der Infrastrukturen scheinen relevant zu sein; damit ist die Frage nach der Veränderbarkeit von gesellschaftlichen Bedarfen an Infrastrukturen angesprochen.

Innovation ist kein Selbstläufer, und Veränderung provoziert oft Widerstand. In der Innovations- und Transformationsforschung (vgl. Kluge/Libbe 2006; 2010, Dolata 2009; Beyer 2006) sind vielfältige Hemmnisse für Anpassungen, die Weiterentwicklung und Transformation von sozialen und technischen Systemen belegt. Im Folgenden werden die zentralen Hemmnisse für eine Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme identifiziert, die mit Blick auf die vier Fallstudien im Vorhaben RELIS relevant werden können. Die Hemmnisse betreffen die verschiedenen Dimensionen von Infrastrukturen als sozio-technische Systeme und den Weiterentwicklungs- bzw. Transformationsprozess.

Als übergeordneter konzeptioneller Zugang zur Frage und Umgang mit Hemmnissen wird mit dem Begriff der „Pfadabhängigkeit“ operiert. Denn zur Erklärung von Entwicklungen und der Umgestaltung von netzgebundenen Infrastruktursektoren liefert das Konzept der „Pfadabhängigkeit“ (Beyer 2006; Knieps 2011) instruktive/anregende Ansätze. Das Pfadabhängigkeit betont „(…) die *Historizität* von Institutionen, wobei angenommen wird, dass in der Vergangenheit getroffene Entscheidungen und eingebürgerte Denkweisen und Routinen in die Gegenwart hineinwirken“ (Mayntz 2002, S. 27–30;

nach: Beyer 2006, S. 12, Hervorhebung im Original). Damit kann dem Konzept der Pfadabhängigkeit ein zwar impliziter (Struktur-)Konservatismus unterstellt werden (Beyer 2006, S. 12), indem es von der Transformation als Ausnahme und Abweichen vom Pfad (Regel) ausgeht, jedoch schließt es Transformation nicht aus. Es lenkt den Blick auf Barrieren und Hemmnisse, die eine zielgerichtete und beabsichtigte Umgestaltung von Infrastrukturen erschweren und daher anregend sein können, Ideen zu deren Überwindung zu entwickeln. Pfadabhängigkeiten des Bestands an Infrastrukturen können institutioneller, technisch-materieller, ökonomischer und sozio-kultureller bzw. mentaler Art sein.

Die im Folgenden sondierten Hemmnisse werden wie folgt sortiert:

- Institutionen
- Technik
- Akteure:
  - Unternehmen (Anbieter)
  - Kunden (sozio-kulturelle Dispositionen der Nachfrageseite)
- Prozessmanagement (strategische Orientierung, Komplexität, Zeit)
- Daten/Digitalisierung

### 3.1.1 Institutionen

Institutionen sind von zentraler Bedeutung bei der Entwicklung und den möglichen Pfaden einer Weiterentwicklung (oder Transformation) von Infrastruktursystemen. Denn Institutionen bilden den Rahmen oder – um es in einem anderen Bild auszudrücken – umreißen das Feld mitsamt seinen Spielregeln, auf dem sich Entwicklungen abspielen – oder auch nicht. Institutionen werden i.d.R. allgemein und auch in RELIS im weiteren Sinne als Regeln oder Regelsysteme verstanden, die sowohl formeller (Gesetze, Verordnungen, Satzungen, Verträge, Normen etc.) als auch informeller Natur (Verhalten, Routinen, Absprachen etc.) sein können (Scharpf 1997; Jansen, 2000). Institutionen regulieren Verhalten, legen bestimmte, d. h. regelkonforme Entscheidungen nahe (bei Abweichungen von der Regel drohen negative Sanktionen) und bieten damit Orientierung und Sicherheit (Scharpf 1997; Jansen 2000; Konrad et al. 2008). Für die Weiterentwicklung von Infrastrukturen können Institutionen hemmend wirken, wenn mit innovativen Techniken oder Verfahren bekannte und in der Vergangenheit „bewährte“ Regeln/Institutionen infrage gestellt werden. Denn wenn innovative Weiterentwicklungen nicht zu den bestehenden Institutionen passen und umgekehrt, müssen Institutionen angepasst oder gar abgeschafft werden; gelegentlich müssen auch erst vollkommen neue Institutionen entwickelt werden (Bedtke 2016).[90] Institutionen sind demnach prinzipiell veränderbar, auch wenn weder das Ergebnis eines Institutionenwandels vorhergesagt werden kann, noch die Folgen bzw. Wirkungen der veränderten Institutionen auf die Performance des (Infrastruktur-)Systems prognostizierbar sind.

Als Beispiel für Hemmnisse, die sich aus formellen Institutionen heraus ergeben, können der (noch) *nicht passfähige* Rechtsrahmen für „Autonomes Fahren“ und neue Formen des Car- und Ridesharing (Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“) genannt werden, wo noch viele offene, insb. Haftungsfragen zu klären sind. Ein anderes Beispiel sind *bestehende* Normen für Eigenschaften und Qualitäten von Baustoffen, die die Einführung von Baustoff-Recycling und explizit die Verwendung von Recycling-Beton und -Asphalt (Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“) erschweren.

Aber auch *fehlende* Normen können ein Hemmnis sein. Zum flächendeckenden Aufbau von Ladeinfrastruktur für Elektromobilität (Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr”) sind einheitliche Normierungen vorteilhaft, da z. B. das Ladesäulen-Netz dann dichter gesponnen werden kann. Auch der Einsatz

90 Based on an understanding that the transformation of water infrastructure systems is a process of innovation, “from an institutional perspective, the maturing of an innovation is reflected by the development of a new set of institutions that could co-exist or undermine those of the established regime” (Rogers et al. 2015, p. 2).

von Oberleitungs-Lkw (Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr") in Deutschland erfordert im Europäischen Binnenmarkt und vor dem Hintergrund der Lage Deutschlands als Transitland und Drehscheibe für Warenströme eine europäische Normung der Techniken (Oberleitungen sowie Fahrzeuge) bzw. Regeln ihrer Nutzung.

Gesetze und rechtlich geregelte Verfahren können Planungsprozesse für neuartige Infrastrukturlösungen hemmen bzw. in der Geschwindigkeit ihres Umbaus bremsen, wenn neuartige Lösungen nicht in die gängigen etablierten Schemata passen und sich Planungsprozesse etwa in ihren Beteiligungsmodellen als sehr komplex erweisen (vgl. kommunale Verkehrsplanung in Abstimmung mit Umweltbehörden, Ordnungsämtern und Tiefbauämtern; oder die Planung von Stromtrassen) (Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich", Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr"). Damit sollen keineswegs eine umfangreiche Beteiligung von Stakeholdern und stringente, rechtlich normierte Planungsprozesse infrage gestellt werden. Es wird in diesem und dem Beispiel der Normen im Baustoffrecycling jedoch erkennbar, dass Institutionen sich durch Beharrungskräfte auszeichnen und ein Hemmnis für die Weiterentwicklung bzw. einen Umbau und Anpassung von Infrastruktursystemen sein können.

### 3.1.2 Technik

Infrastrukturen als „großtechnische Systeme" (Monstadt 2007) umzugestalten, ist in der Regel mit hohen Investitionskosten verbunden und je nach Komplexität und Innovationsgrad der Technik auch unterschiedlich anspruchsvoll und herausfordernd. Der mit den einzelnen Fallstudien verbundene Um- und Ausbau von Infrastrukturen bzw. Teilsystemen und Komponenten ist, wenn nicht ein Hemmnis, so doch eine große Herausforderung.

Ein konkretes Hemmnis für die Umsetzung der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen" liegt beispielsweise im notwendigen Ausbau und der Anpassung der regionalen und lokalen Verteilnetze (Strom, Gas), über die ein Großteil der angestrebten Kopplungen abgewickelt wird: Power-to-gas, Biogas, Lastmanagement, smart grids. Denn „Ausbau der Verteilnetze" impliziert Raumordnungs- und Planungsverfahren und die Koordination und Finanzierung der baulichen Umsetzung. Diese Herausforderung stellt sich umso mehr in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr", wo ein enormer Zubau an erneuerbaren Energieanlagen, Stromnetzen und Umwandlungsanlagen (PtX) notwendig ist. Dieser muss nicht nur finanziert, sondern auch technisch-planerisch gemeistert werden. Zudem ist in dieser Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr" flächendeckend Ladeinfrastruktur für Elektromobilität und Oberleitungen für Lkw an Autobahnen aufzubauen.

Einzelne Maßnahmen und Optionen der sektorenübergreifenden Kopplungen in Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen" können Konkurrenzen zwischen den Sektoren/Teilsystemen bewirken. Etwa wenn einerseits Fernwärmenetze als Energiespeicher für erneuerbaren Strom genutzt werden und andererseits Wärmepotenziale aus dem Abwasser geschöpft werden sollen, was eine Umrüstung auf Niedertemperaturnetze erfordert. In diesem Kontext wird auch die bisher auf konzeptioneller Ebene ungeklärte Frage von semi-/zentralen Wärmenetzen (Fern- und Nahwärme) gegenüber einer dezentralen Wärmeversorgung auf Hausebene (Wärmepumpe, Mini-BHKW) relevant. Diese (technische) Frage wurde für die Fallstudie nicht geklärt und vertiefend thematisiert, da sie nicht pauschal, sondern nur in konkreten räumlichen, d. h. z. B. quartierlichen, gesamtstädtischen oder regionalen, Kontexten sinnvoll diskutiert werden kann.

Ein anderes Beispiel ist die Abstimmung von unterschiedlichen „Flexibilitätsoptionen" im regionalen und lokalen Verteilnetz; d. h. die Abwägung zwischen Stromspeichern (Batterien), Power-to-heat, Power-to-gas, Lastmanagement und smart grids. Es können sich hier systemimmanente Widersprüche (z. B. kann die Wahl einer Maßnahme andere Maßnahmen der regionalen Stromspeicherung im Verhältnis zum Speicherbedarf ausschließen; Stichwort „Kannibalisierung") aufgrund von Sektorkopplungen auftun, die zwischen den betroffenen Akteuren und vor dem Hintergrund ihrer Interessen und

Vorstellungen ausgehandelt werden müssen. Diese Auseinandersetzung vor dem Hintergrund von Interessengegensätzen kann Prozesse verzögern oder gar blockieren.

In der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich" sind die Verkehrsinfrastruktur umzubauen und IKT-Infrastruktur für die „smarte" Steuerung aufzubauen. Für einzelne technische Optionen ist zudem die technische Umsetzbarkeit in der Fläche noch zu klären.

### 3.1.3 Akteure

#### 3.1.3.1 Entscheidungsträger und Unternehmen der Infrastrukturbereitstellung

Pfadabhängigkeiten können auch in Form von informellen Institutionen wie etwa persönlichen Überzeugungen und Unternehmenskulturen wirksam werden. Demnach prägen in der Vergangenheit erworbene kulturelle Muster und mentale Dispositionen/Einstellungen die Entscheidungen der handelnden Akteure für die Zukunft. Entscheidungsträger in Politik, Verwaltung und Unternehmen sind durch frühere Entscheidungen geprägt und „verlassen sich" auf bekannte Lösungen, auch wenn diese vor dem Hintergrund veränderter Rahmenbedingungen und Anforderungen ggf. nicht mehr optimal/adäquat sind.

Für einige der in den Fallstudien angelegten Maßnahmen sind noch keine oder nicht hinreichend attraktive, marktfähige Produkte und Dienstleistungen entwickelt worden; bzw. sie sind (noch) zu teuer oder bieten dem Kunden keinen erkennbaren Zusatznutzen gegenüber den bekannten Systemen. Ein eingängiges und offensichtliches Beispiel hierfür ist die Elektromobilität in Form von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Diese sind nicht nur teurer als Autos mit Verbrennungsmotor, sondern haben auch eine kürzere Reichweite und benötigen mehr Zeit zum Laden der Batterien im Vergleich zum Tankvorgang. Der Zusatznutzen der besseren $CO_2$-Bilanz im Fahrbetrieb scheint nur für wenige Menschen ein Kaufargument zu sein.

Mit Blick auf die Umsetzung der Fallstudien kann davon ausgegangen werden, dass wenn aus den vorgeschlagenen Maßnahmen ein konkreter, klarer, nachvollziehbarer oder belegter Nutzen ableitbar ist, der sich zudem konkreten Zielgruppen zuordnen lässt und sich (kommunikativ) auf diese zuschneiden lässt, Unternehmen dann auch entsprechende Produkte entwickeln werden, die sich auf dem Markt durchsetzen können. In den Best-Practice-Beispielen im Teil D sind einzelne erfolgreiche Produkte und Ansätze dokumentiert. Gleichwohl bilden auch die Best-Practice-Beispiele oftmals noch eher Nischenansätze ab. Wo marktfähige Produkte fehlen bzw. nicht in Sicht sind, entwickeln sich auch Geschäftsmodelle und Unternehmensstrategie nur bedingt weiter. Dieser möglicherweise zu konstatierende Mangel an neuartigen, angepassten Unternehmensstrategien und Geschäftsmodellen korreliert mit fehlenden strategischen Transformationskonzepten auf der planerischen Ebene.

Die aktuellen Geschäftsmodelle der Energieversorgungsunternehmen sind in der Breite (noch) nicht an die veränderten, gekoppelten Infrastruktursysteme angepasst – auch wenn hierzu eine aktive Diskussion in Gang ist und einige „Pioniere" entsprechende Modelle und neuartige Dienstleistungen entwickelt und bereits am Markt platziert haben.

Aus der Innovationsforschung ist bekannt, dass Innovationen dann aus der Nische in die Verbreitung kommen, wenn hinter einer (technischen) Innovation nicht nur eine marktfähiges Produkt, sondern auch entsprechende Geschäftsmodelle stehen (vgl. Teece 2010). Solange demnach keine erfolgversprechenden Geschäftsmodelle existieren und diese von relevanten Akteuren im Markt verfolgt werden, werden die in den Fallstudien skizzierten Maßnahmen sich nur bedingt als Innovationen durchsetzen können. Dies betrifft etwa die Nutzung und Vermarktung von Abwärme (Abwasser, Rechenzentren), tragfähige Modelle für den Betrieb von PtX-Anlagen oder Angebote für innovative intermodale Verkehrsmittelnutzung. Gleichwohl zeigen verschiedene Best-Practice-Beispiele in Teil D, dass marktfähige Produkte und Dienstleistungen existieren, die mit entsprechenden Geschäftsmodellen weiter

gestärkt werden können. Positiv hervorzuheben ist, dass sich im Bereich des Lastmanagements und virtueller Kraftwerke scheinbar Dienstleistungen zu Geschäftsmodellen verdichten und etablieren (vgl. NEXT-Kraftwerke) (Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen").

Ein anderes Beispiel sind die aktuellen Geschäftsmodelle der Automobilindustrie, die die in der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich" angelegten Potenziale eher zögerlich in den Blick genommen haben und weiterhin auf den Absatz von (PS-starken) Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor setzen. Die mit der Umsetzung der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich" und der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr" verbundenen notwendigen Strukturanpassungen der Automobilindustrie[91] können als ein weiteres Hemmnis identifiziert werden. Dabei wirken die Strukturanpassungen bremsend für die Umsetzung der Fallstudie, wenn ganze Wertschöpfungs- und Produktionsketten sowie Verfahren samt Maschinen angepasst werden müssen. Mögliche Notwendigkeiten für Strukturanpassungen wirken auch politisch, wenn Unternehmensvertreter die Politik vor negativen (arbeitsmarktpolitischen) Folgen eines Strukturwandels der deutschen Automobilindustrie warnen.[92]

Die Kopplung von Verkehr und Energie in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr" und der darin angelegte flächendeckende Umstieg auf Elektromobilität machen einen umfangreichen Ausbau von öffentlicher[93] und privater Ladeinfrastruktur notwendig. Für den Betrieb dieser Infrastrukturen und deren Nutzung fehlen ebenfalls geeignete Geschäftsmodelle – sei es von Energieversorgern, von Automobilkonzernen oder von Elektromobilitätsdienstleistern.

Als Hemmnisse im Zusammenhang mit der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz" können in diesem Zusammenhang bisher fehlende Märkte für Recycling von Baustoffen und Sekundärrohstoffe benannt werden. Dies betrifft sowohl die Angebotsseite von qualitativ gleichwertigen und zu konkurrenzfähigen Kosten aufbereiteten Baustoffen aus Recycling als auch die Nachfrageseite (Bauunternehmer). Die in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz" betrachteten Baustoffe für den Straßenbau werden in regionalen Märkten gehandelt. Hier ist in vertretbaren räumlichen Dimensionen (Umkreis von XX km für Transportweg von Kies, Beton, Asphalt) Angebot und Nachfrage zu koordinieren. Als weiteres Hemmnis kann auch fehlendes Know-how zum Einsatz und zur Verwendung der Recyclingmaterialien/Sekundärrohstoffe genannt werden.

Ein Hemmnis für die Umsetzung von Ökodesign (z. B. Updatefähigkeit, modulare Bauweise und Reparaturfreundlichkeit) beispielsweise im IKT-Sektor kann in der Marktpolitik der Hersteller liegen. Die Politik der Hersteller orientiert sich einerseits an den Kunden, die in Masse möglicherweise nicht bereit sind, die mit Ökodesign verbundenen höheren Produktionskosten zu tragen. Zudem können ggf. erst durch eine integrierte Bauweise technische Anwendungen ermöglicht werden, deren zusätzlicher Nutzen von den Kunden höher bewertet wird als der (ökologische) Nutzen eines modularen, gut reparierbaren, aber weniger leistungsfähigen Produkts. Andererseits geben Institutionen den Rahmen vor, so dass durch regulatorische Maßnahmen Einfluss auf die Produkt- und Marktpolitik der Hersteller genommen werden kann.

#### 3.1.3.2 Kunden: sozio-kulturelle Dispositionen der Nachfrageseite

Sozio-kulturelle Dispositionen (Werte, Einstellungen) drücken sich insbesondere in „Lebensstilen" (vgl. Sinus 2015) aus. Menschen, die unterschiedliche Lebensstile und Einstellungen verkörpern, wer-

91 Siehe zur Innovationsbereitschaft der Automobilindustrie das Verhalten im Zuge der Manipulationen von Abgaswerten.

92 Andererseits wird sichtbar, dass z. B. die deutsche Autoindustrie Innovationen und Märkte nicht rechtzeitig als zukunftsfähig einstuft, wenn wie aktuell in China Quoten für Elektroautos ins Spiel gebracht werden.

93 „Öffentliche" Ladeinfrastruktur meint nicht, dass die Infrastruktur öffentlich betrieben wird, wohl aber, dass sie öffentlich bzw. allgemein zugänglich ist.

den sich sehr unterschiedlich von einzelnen Maßnahmen in den Fallstudien angesprochen fühlen oder sie ablehnen. Dies gilt für die Dimension der Attraktivität von Produkten, und es gilt ebenso für Maßnahmen (Dienstleistungen), die stark auf Verhalten und soziale Innovation abzielen. Vertreter eines Lebensstils „docken“ leichter an bestimmte Maßnahmen an als andere. Damit zusammen hängt die Akzeptanz einzelner Maßnahmen insb. in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ (vgl. Einschätzung qualitativer Kriterien in Teil C Kapitel 2.4.7). Personen bzw. Lebensstile mit einer ausgeprägten Autoaffinität werden die Maßnahmen der Verkehrsvermeidung anders annehmen und bewerten als Vertreter des „sozialökologischen Milieus“ (Sinus-Studie). Letztere wiederum mögen die dichte Ausstattung mit IKT-Infrastruktur zur Steuerung der Verkehre (Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich”) kritisch sehen. Denn diese erfordert doch einen flächendeckenden Aufbau von Funkmasten. Die mit den Funknetzen verbundene Strahlenbelastung kann die „gesellschaftliche Akzeptanz“ in Teilen der Bevölkerung ggf. einschränken und damit die Umsetzung der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich” hemmen.

Zudem baut eine Reihe von Maßnahmen der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich” auf einer „Kultur des Teilens“ (Car-/Bike-/Ridesharing) auf (auch hier lebensstilabhängig) und setzt insb. in den Maßnahmen neuer Mobilitätsformen im ländlichen Raum auf gesellschaftliches Engagement. Dieses notwendige gesellschaftliche Engagement mag sich aus der Not heraus entwickeln, wenn sonst kein Angebot verfügbar wäre. Gleichwohl ist ein Minimum an „sozialem Kapital“ etwa einer Dorfgemeinschaft erforderlich, um die skizzierten neuen Mobilitätsformen zu organisieren und z. B. Bürgerbusse zu realisieren. Hier kann die öffentliche Hand unterstützen.

Sozio-kulturelle Dispositionen in Form von Gewohnheiten und Handlungsroutinen können auch z. B. die Umwidmung von Straßen hemmen. Ebenso können implizite oder offen formulierte gesellschaftliche Vorstellungen von räumlicher Erschließung (nahezu ubiquitäre Verfügbarkeit von Infrastrukturdienstleistungen) und (zeitlicher) Erreichbarkeit auf Basis von Verkehrsinfrastrukturen (z. B. maximale Fahrzeiten zur Erreichung eines Autobahnanschlusses) deren Rückbau bzw. Umwidmung erschweren. Dies gilt zumal dann, wenn keine attraktiven Alternativmodelle/-konzepte einer Umnutzung der bestehenden Infrastrukturen bzw. deren modifizierter Nachnutzung dem Bestand und der gewohnten Nutzung gegenübergestellt werden (können) (Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich”, Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“).

### 3.1.4 Prozessmanagement: strategische Orientierung, Komplexität, Zeit

Die Anpassung und Weiterentwicklung von Infrastruktursystemen ist ein langwieriger Prozess, in dem eine Vielzahl an Faktoren bedacht und Akteure beteiligt werden müssen. Faktoren und Akteure interagieren wiederum miteinander, sie beeinflussen sich wechselseitig, und das nicht immer widerspruchsfrei. Die Anpassung und Weiterentwicklung von Infrastruktursystemen ist daher komplex. Erschwerend kommt hinzu, dass keine zwischen den relevanten Stakeholdern[94] geteilten Leitbilder/Vorstellungen und strategischen Ziele zur Infrastrukturentwicklung existieren. Schon die im Titel dieses Vorhabens genannten Ziele (ressourcenleicht, zukunftsfähig, umweltschonend, robust, demografiefest) stehen nicht immer widerspruchsfrei zueinander. Die Wechsel- und Auswirkungen einer bestimmten Vorgehensweise auf die verschiedenen Zielparameter können nicht restlos objektiv aufgelöst, sondern nur politisch entschieden werden. Eine (politische) Auseinandersetzung mit strategischen Fragen des Umbaus bzw. der Weiterentwicklung der Infrastrukturen findet im Kontext der Energiewende-Debatte statt. Andere Sektoren sind hiervon jedoch ausgenommen (insb. Wasser/Abwasser) oder werden nur nachrangig diskutiert. Im Zuge der Thematik Klimaschutz und Klimaanpassung öffnen sich derzeit auch in der Siedlungswasserwirtschaft neue Diskursräume. Die strategi-

94 Je nach Sektor und dessen räumlicher Skalierung betrifft dies Akteure auf nationaler, regionaler oder lokaler Ebene.

sche Bedeutung des Infrastrukturumbaus für unsere Gesellschaft wird nur selten als solche thematisiert.

Ein zentraler Punkt für die Weiterentwicklung von Infrastruktursystemen sind strategische Gestaltungs- oder Umgestaltungskonzepte (Transformationskonzepte). Diese Konzepte sollten einerseits Orientierung bieten (Ziel/Leitbild) und andererseits dazu beitragen, die Komplexität des Gegenstandes (Infrastruktursysteme) und des Prozesses zu reduzieren. Die Herausforderung für die Erstellung der Konzepte ist, dass sie die komplexe Situation und komplexen Bedingungen (im jeweiligen Raumkontext) angemessen aufgreifen müssen und zugleich z. B. bestimmte Akteure oder deren Anliegen nicht von vornherein ausblenden dürfen. Dies gilt zum Beispiel sowohl für die regionale Ebene (hier insbesondere Stromerzeugung und -verteilung sowie Verkehr) als auch für die räumliche Ebene der Stadt (Trinkwasser und Abwasser, ÖPNV) und städtische Teilräume/Quartiere (Wärmeversorgung), in denen die Weiterentwicklung und Kopplungen der technischen Infrastrukturen konkret mit den Akteuren in Bezug auf den Gebäudebestand und Flächennutzungen verhandelt werden können. Durch das Fehlen von Transformationskonzepten auf den unterschiedlichen räumlichen Skalen und deren Integration fehlt eine grundsätzliche, strategische Orientierung, sodass eine konsistente, abgestimmte Umsetzung von Maßnahmen der Weiterentwicklung erschwert – wenn nicht gar unmöglich – wird. Ebenso fehlen oftmals geeignete Organisationsstrukturen und vereinbarte Prozesse zur organisierten Kooperation der vielfältigen, benötigten Akteure.[95]

Infrastrukturen sind durch lange Abschreibungszeiträume und Nutzungsdauern gekennzeichnet, wobei die einzelnen Komponenten und Netze sich z. T. erheblich unterscheiden können. Diese Eigenschaft wirkt z. B. in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen" über die z. T. sehr divergierenden und langen Abschreibungszeiträume und Nutzungsdauern der einzelne Komponenten und Netze (Pfadabhängigkeit). Im Vorhaben RELIS wird für die orientierende Stoffstrombilanzierung beispielsweise für die Abwassernetze von einer Nutzungsdauer von 100 Jahren, Abwasserbehandlungsanlagen 50 Jahre, Erdgasnetze 30 Jahre, Biogasanlagen 20 Jahre oder Klein-BHKW zehn Jahre ausgegangen. Die Synchronisierung, d. h. die zeitliche Abstimmung eines konsistenten Umbaus verschiedener, gekoppelter Teilsysteme und ihrer Komponenten stellt damit eine zentrale Herausforderung dar. Dies gilt für diese Fallstudie umso mehr, wenn nicht nur die Weiterentwicklung der öffentlichen Infrastrukturen (Abwassersysteme, Niedertemperaturwärmenetze) koordiniert, sondern auch private Hausinstallationen im Gebäudebestand (z. B. Heizungssysteme für Niedertemperaturwärmeversorgung) mit den öffentlichen Infrastrukturen im Umbauprozess aufeinander abgestimmt werden müssen (Ko-Transformation). Diese zeitliche Abstimmung der Maßnahmen dürfte eines der zentralen Hemmnisse in der Umsetzung der Fallstudie sein.

Die zeitliche Komponente kommt auch in Innovationszyklen zum Ausdruck. Diese haben sich insb. in den IKT in den vergangenen Jahren verkürzt. Einerseits liegen hierin Effizienzpotenziale, wenn man davon ausgeht, dass innovative Lösungen i.d.R. energieeffizienter sind, andererseits ergibt sich hieraus ein Zwang zur permanenten Aktualisierung von Technik, die eine ressourcenleichte Gestaltung der Infrastrukturen etwa in Form von Modularität und Recyclingfähigkeit (Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz") ebenfalls hemmen kann.

Die zuvor genannte Herausforderung einer zeitlichen Abstimmung der Anpassungsmaßnahmen und Weiterentwicklungen ist ein Beispiel für die Komplexität sektorenübergreifender Planung und Koordination. Planungsprozesse, die mehrere Infrastruktursysteme und Politikfelder integriert bearbeiten, haben auch immer mit unterschiedlichen Disziplinen, Erfahrungen, Leitbildern/-vorstellungen und Interessen der Akteure zu tun bzw. zu „kämpfen". Sie stellen hohe Anforderungen an die Koordination und Kommunikation dieser Planungsprozesse, wenn hieraus eine effektive Kooperation entstehen soll.

95 Vgl. für das Beispiel der Umgestaltung der Wärmeversorgung im Quartier Riechel/Koritkowski (2016).

Fraglich ist, welche Akteure die (fachlichen, methodischen und kommunikativen) Kompetenzen für effektive Beteiligungsverfahren und Kooperationsmanagement (vgl. Kerber et al. 2016) einbringen können. Zweifel kommen zumindest auf, wenn man sich die finanzielle und personelle Ausstattung der öffentlichen Hand (insb. der Kommunen) ansieht. Auch hierin kann ein Hemmnis für die Umsetzung der Fallstudien liegen; etwa der Sektorkopplungen in den Fallstudien „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen" und „Kopplung Energie – Verkehr".

Immer kürzere Innovationszyklen und eine nicht zu durchdringende Komplexität aufgrund vielfältiger Interdependenzen führen zu einer stark reduzierten Prognostizierbarkeit der Folgen von Entscheidungen. Die Weiterentwicklung und Umgestaltung der Infrastruktursysteme ist schwer planbar und geeignet, die Entscheidungsträger in Politik, Verwaltung und Unternehmen mit seiner Komplexität zu überfordern. Vor dem Hintergrund der in Teil B genannten Rahmenbedingungen, Trends und Veränderungsprozesse sowie der hier diskutierten Hemmnisse einer Weiterentwicklung der Infrastrukturen wird der Umgang mit Unsicherheit und Nicht-Wissen zunehmend wichtiger. Eine prinzipielle Risikoaversion und der schwierige Umgang mit Unsicherheiten können als weiteres Hemmnis identifiziert werden.

### 3.1.5 Daten/Digitalisierung

Die Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen setzen in unterschiedlichem Maße auf Digitalisierung und eine smarte Verknüpfung bzw. Steuerung der Infrastruktursektoren und ihrer Komponenten. Beispiele sind smart grids und Lastmanagement in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen", innovative Mobilitätsangebote (Ridesharing) und smarte Verkehrssteuerung in der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich" oder die intelligente Steuerung der Ladeinfrastruktur in der Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr". Herzstück der Digitalisierung sind nicht die technischen IKT-Infrastrukturen, sondern die produzierten und verarbeiteten Daten. Hier stellen sich die Fragen, welche Daten wem „gehören", für was und durch wen sie genutzt werden dürfen und wie diese Daten weiterverarbeitet werden dürfen. Digitalisierung der Infrastruktursysteme berührt im Kern die Themen Datensicherheit und -schutz, die Frage nach dem angemessenen Verhältnis von (Daten-) Transparenz (open data), Zugang zu Daten und Intimität/Vertraulichkeit. Einige der Maßnahmen in der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich" wie smarte Mobilitätsdienstleistungen und Verkehrssteuerung erzeugen vielfältige personenbezogene Daten und Bewegungsprofile, die geeignet sind, das Recht auf „informationelle Selbstbestimmung"[96] auf die Probe zu stellen.

## 3.2 Sensitivitätsanalysen

Anhand von Sensitivitätsanalysen lässt sich abschätzen, welche getroffenen Annahmen sich besonders stark auf das Endergebnis auswirken, d. h. wie sensitiv die Berechnungen auf diese Annahmen reagieren. Dieses Wissen hilft bei der Einordnung der Ergebnisse und zeigt Annahmen auf, die besonders sorgfältig getroffen werden sollten oder bei welchen ggf. mit verschiedenen Szenarien gerechnet werden sollte.

96 „Um den Schutz der Privatsphäre – gerade vor dem Hintergrund moderner Datenverarbeitung – zu stärken, hat das Bundesverfassungsgericht in einer Entscheidung aus dem Jahr 1983 das "Recht auf informationelle Selbstbestimmung" entwickelt (sog. "Volkszählungsurteil", BVerfGE 65,1 [41]). Es verleiht dem Einzelnen die Befugnis, grundsätzlich selbst zu bestimmen, wann und in welchem Umfang er persönliche Lebenssachverhalte preisgeben möchte. Das Recht auf informationelle Selbstbestimmung ist Bestandteil des allgemeinen Persönlichkeitsrechts, das durch Art. 2 Abs. 1 i.V.m. Art. 1 Abs. 1 des Grundgesetzes geschützt wird. Es genießt daher Verfassungsrang und ist wesentliche Ausprägung der Menschenwürde und der allgemeinen Handlungsfreiheit." (vgl. http://www.bmi.bund.de/DE/Themen/Gesellschaft-Verfassung/Datenschutz/Informationelle-Selbstbestimmung/informationelle-selbstbestimmung_node.html)

In der in RELIS durchgeführten Sensitivitätsbetrachtung wurden einzelne Eingangsparameter (Annahmen) wie beispielsweise Annahmen zur künftigen Bestandsentwicklung variiert und die Abweichung der Endergebnisse dargestellt. Die Abweichung der Ergebnisse wird für folgende Bereiche dargestellt:

- Bau und Unterhalt der Infrastruktur,
- Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur sowie
- Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung (fossile Erzeugungsanlagen) der Infrastruktur.

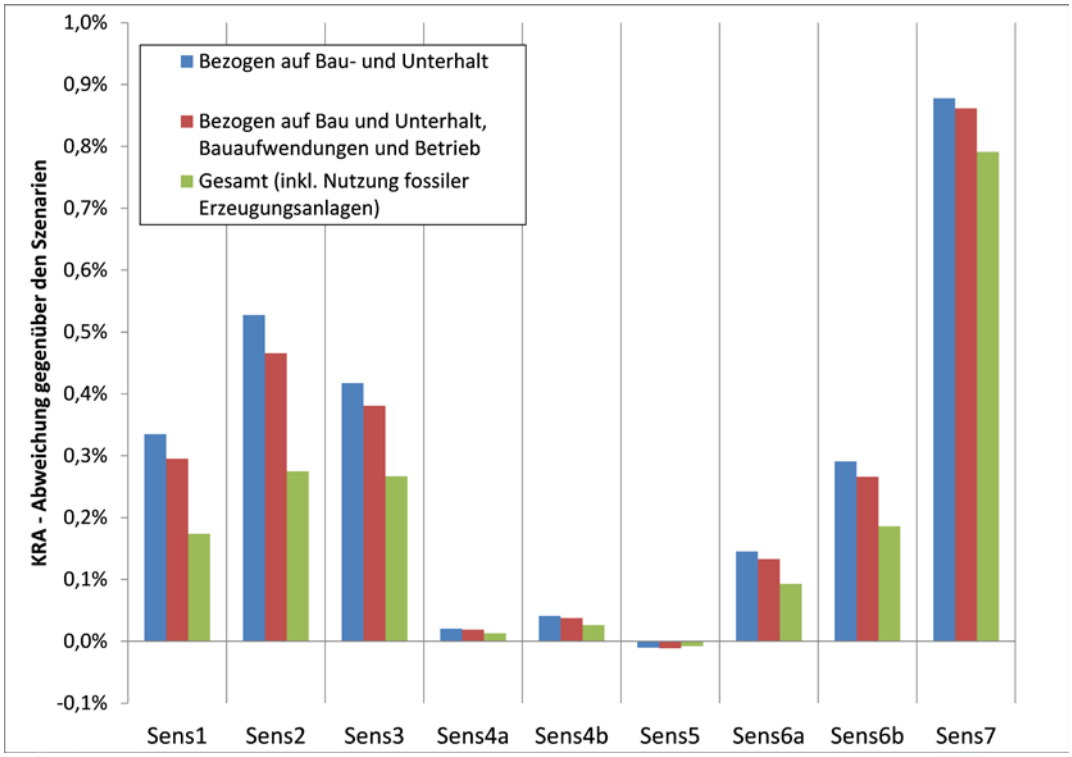
Folgende sieben Sensitivitäten wurden gerechnet:

- **Sensitivität 1 (Ausbau Stromnetze)**: Es besteht eine größere Unsicherheit hinsichtlich des Ausbaufades der Stromnetze, da dieser von einer Vielzahl Variablen (Ausbau EE, Strategien Lastmanagement und Speichertechnologien usw.) abhängt. In dieser Sensitivität wird deshalb gegenüber den Annahmen im Referenzszenario, welche auf dem Netzentwicklungsplan basieren, von einem stärkeren Netzausbau ausgegangen. Dafür wurde für das Jahr 2030 gegenüber dem Referenzszenario auf Basis der oberen Grenze aus Dena (2012) ein höherer Bestand an Stromnetzen veranschlagt. Gegenüber dem Referenzszenario wird für Hochspannungsleitungen im Jahr 2030 ein um 20 % höherer Bestand veranschlagt. Für das Mittelspannungsnetz liegt der Bestand im Jahr 2030 um 24 % über dem Referenzszenario, im Niederspannungsnetz sind es 5 %.
- **Sensitivität 2 (starker Ausbau Stromnetze)**: Hier wurde analog Sensitivität 1 von höheren Beständen der Übertragungsnetze im Jahre 2030 ausgegangen, wobei sich diese Sensitivität nicht auf das Referenzszenario sondern die Fallstudie 2 „Kopplung Energie – Verkehr“ bezieht. Die unter Sensitivität 1 genannten Aufschlägen wurde in dieser Sensitivität für alle Netzebenen nochmals um 10 %-Punkte erhöht (HS +30 %; MS +34 %; NS +15 %).
- **Sensitivität 3 (Ausbau Gasnetze)**: Die Annahmen hinsichtlich des Ausbaupfades der Regional- und Ortsnetze für Gas sind mit Unsicherheiten behaftet, da hier ein deutlich geringes oder höheres Wachstum eintreten kann. Unterschiedliche Entwicklungen könnten z. B. durch die Versorgungssicherheit mit Gas, den Entwicklungen bezüglich Power-to-Gas-Anlagen, einer stärker strombasierten Wärmeversorgung, der Bedarfsentwicklung an Raumwärme und der Marktdurchdringung von Alternativen zu fossilen Brennstoffen beeinflusst werden. In dieser Sensitivität wird betrachtet, wie sich ein gegenüber dem Referenzszenario um 5 % höherer Bestand an Regional- und Ortsverteilnetzen Gas im Jahr 2050 auf das Ergebnis auswirkt.
- **Sensitivität 4 (a & b) (Ausbau Wärmenetze):** Auch die Annahmen zum Ausbau der Fernwärmenetzte sind mit Unsicherheiten behaftet. Der Ausbau ist noch relativ gering und sinkt derzeit vor allem in den östlichen Bundesländern. So sind Entwicklungen denkbar, in denen Raumwärme stärker dezentral z. B. strombasiert erzeugt wird. Unklar ist beispielsweise auch der Einfluss eines möglichen Rückganges an Müllverbrennungsanlagen durch verstärktes Recycling oder die Nutzung der Wärmenetze als Energiespeicher durch Power-to-Heat-Anlagen, welche an Bedeutung gewinnen könnten. In dieser Sensitivität wird deshalb betrachtet, wie sich ein gegenüber dem Referenzszenario um 5 % (a) bzw. 10 % (b) höherer Bestand an Nahwärmenetzen im Jahr 2050 auf das Endergebnis auswirkt.
- **Sensitivität 5 (Abwasserbehandlungsanlagen)**: Diese Sensitivität hilft die Annahmen hinsichtlich der Entwicklung von Kleinkläranlagen einzuordnen. Gegenüber dem Bestand im Jahr 2050 wird in dieser Sensitivität ein geringfügiger Rückbau an Abwasserbehandlungsanlagen GK II& III (-4 % & -10 %) und Ausbau GK I (16 %) unterstellt. Damit lässt sich abschätzen, inwieweit sich eine stärkere Durchdringung von kleineren Anlagen auf das Endergebnis auswirkt.

- **Sensitivität 6 (a & b) (Regenwasser)**: Der Ausbau der Abwassernetzes und der Regenentlastungsanlagen könnte in Folge der Anpassung an den Klimawandel stärker steigen als im Referenzszenario unterstellt wurde. In den letzten Jahren wurden höhere Wachstumsraten beobachtet. In dieser Sensitivität wird deshalb betrachtet, wie sich ein um 5 % (a) bzw. 10 % (b) höherer Bestand von Regenentlastungsanlagen und Regenüberlauf; Kanalschächte und Regenwasserkanalnetz im Jahr 2050 auf das Endergebnis auswirkt.
- **Sensitivität 7 (Recycling-Asphalt)**: In der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ (Fallstudie 4) wurden erhebliche Effekte durch das unterstellte Asphaltrecycling festgestellt. In dieser Sensitivität wird deshalb die getroffene Annahme hinsichtlich der Wirkungsfaktoren des RC-Asphaltes auf ihren Einfluss auf das Gesamtergebnis in Fallstudie 4 beleuchtet. Dafür werden die Wirkungsfaktoren für Recyclingasphalt um +10 % variiert. Damit wird der Einfluss der Recyclingqualität bzw. Recyclingquote abgeschätzt.

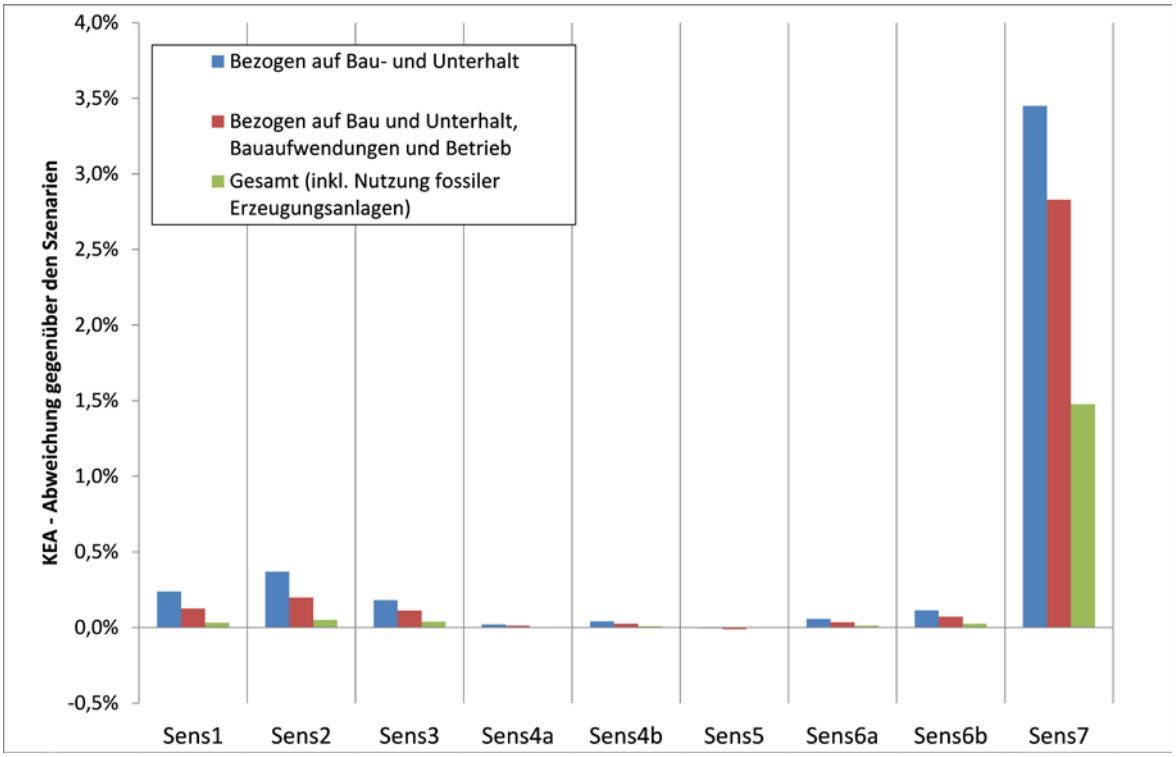
Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 112, Abbildung 113, Abbildung 114) zeigen die prozentualen Abweichungen der sieben Sensitivitätsbetrachtungen gegenüber dem jeweiligen Bezug bzw. Vergleichsszenario (Referenzszenario, Fallbeispiel) im Jahr 2050 bzw. 2030 (Sensitivität 1 und 2) in Bezug auf KRA, KEA und THG-Emissionen.

Abbildung 112: Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung, prozentuale Abweichung des KRA in den Sensitivitäten gegenüber den Szenarien



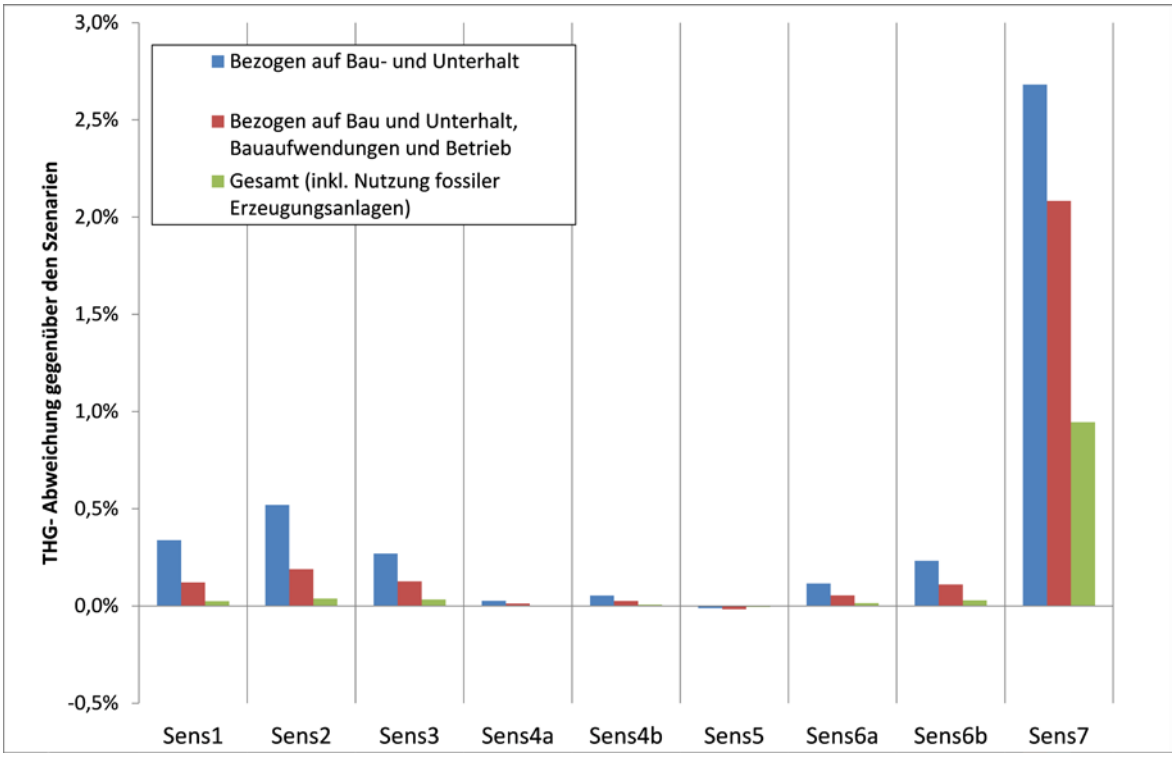

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 113: Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung, prozentuale Abweichung des KEA in den Sensitivitäten gegenüber den Szenarien




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 114: Ergebnisse der Sensitivitätsbetrachtung, prozentuale Abweichung der Treibhausgasemissionen in den Sensitivitäten gegenüber den Szenarien




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Für die **Sensitivität 1** (Ausbau Stromnetze) **und 2** (starker Ausbau Stromnetze), die jeweils von einem deutlich höherem Netzausbau im Jahr 2030 als im Referenzszenario bzw. in Fallstudie 2 ausgehen wird deutlich, dass die Annahmen in einem relevanten Maße auf das Ergebnis durchschlagen. In Bezug auf den Bau und Unterhalt der Infrastruktur ergeben sich eine zusätzliche Ressourceninanspruchnahme (KRA und THG) von rund 0,3 % [Sens 1] bzw. 0,5 % [Sens 2]. Der KEA steigt durch die Anpassung um rund 0,2 % [Sens 1] bzw. 0,4 % [Sens 2]. Werden auch die Bauaufwendungen sowie der Betrieb der Infrastruktur mit in die Betrachtungen einbezogen verringert sich der zusätzliche KRA nur leicht. Beim KEA und THG liegt die Abweichung in diesem Fall nur noch bei 0,1 % [Sens 1] bzw. 0,2 % [Sens 2]. Wird zudem die (außerhalb der Systemgrenzen liegende) Nutzung der fossilen Stromerzeugungsanlagen mit in die Betrachtungen einbezogen sind die Effekte auf KEA und THG-Emissionen vernachlässigbar. Der KRA der Sensitivitäten liegt jedoch auch in diesem Fall noch rund 0,2 % [Sens 1] bzw. 0,3 % [Sens 2] über den Szenarien. Insbesondere bei der Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich des KRA aus Kapitel 7 sollten deshalb diese Unsicherheiten berücksichtigt werden.

Ein ähnliches Bild zeigen die Auswertungen zu **Sensitivität 3** (Ausbau Gasnetze)**.** Auch hier ist der KRA besonders sensitiv auf die Annahmen hinsichtlich der Länge der Gasnetze (Regional- und Ortsnetze). Während der in der Sensitivität unterstellte stärkere Ausbau der Netze in Bezug auf Bau, Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur zu einer Erhöhung um lediglich 0,1 % des KEA und der THG-Emissionen führt, liegt diese hinsichtlich des KRA bei rund 0,3 %.

Die Auswertung der **Sensitivität 4 (a & b)** (Ausbau Wärmenetze)zeigt, dass der Einfluss auf das Gesamtergebnis unabhängig davon ob ein verstärkter Ausbau von 5 % (a) oder 10 % (b) unterstellt wird, vernachlässigbar ist. Lediglich die THG-Emissionen, bezogen auf den Bau und Unterhalt der Infrastruktur steigen bei einer Erhöhung des Bestandes um 10 % [Sens 4 b] leicht um 0,1 %.

Wie **Sensitivität 5** (Abwasserbehandlungsanlagen) zeigt hat die angenommene Entwicklung auf Seiten der Klärwerke hin zu kleineren Anlagen keinen relevanten Einfluss auf das Gesamtergebnis.

Für die **Sensitivität 6 (a & b)** (Regenwasser) zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei Sensitivität 1 und 2: Insbesondere der KRA regiert sensitiv auf die Annahme eines stärkeren Ausbaus des Abwassernetzes und der Regenentlastungsanlagen. Bezogen auf den Bau, Unterhalt, die Bauaufwendungen und den Betrieb der Infrastruktur ergibt sich ein um 0,3 % höheres Endergebnis bei einer Bestandserhöhung von 10 %. Die Wirkungskategorien KEA und THG reagieren weitaus weniger sensitiv und steigen beide nur um rund 0,1 %.

Besonders sensitiv reagiert das Endergebnis auf die in **Sensitivität 7** (Recycling-Asphalt) getroffene Annahme. In dieser Sensitivität wurden ein um 10 % höhere Wirkungsfaktoren für des Recyclingasphalt unterstellt. Da dieser nicht nur bei Netzerweiterungen, sondern auch bei der Erneuerung im Bestand Anwendung findet und die Straßenverkehrsinfrastruktur einen wesentlichen Anteil an den Gesamtergebnissen aller betrachteten Wirkungskategorien haben, besitzen getroffene Annahmen einen großen Einfluss auf das Gesamtergebnis. Bezogen auf den Bau und Unterhalt der Infrastruktur liegt der KRA in dieser Sensitivität um 0,9 %, der KEA um 3,4 % und die THG-Emissionen um 2,7 % über der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“. Werden Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur mit in die Betrachtungen einbezogen reduziert sich diese Abweichung auf 0,9 % (KRA), 2,8 % (KEA) und 2,1 % (THG). Die Größenordnung der Abweichung liegt auf einem Niveau, welches mit den erzielten Einsparungen vergleichbar ist. Die Ergebnisse reagieren demnach stark auf die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Wirkungsfaktoren von Recyclingasphalt, was bei der Interpretation der Ergebnisse von Fallstudie 4 berücksichtigt werden muss.

## 3.3 Szenaretten

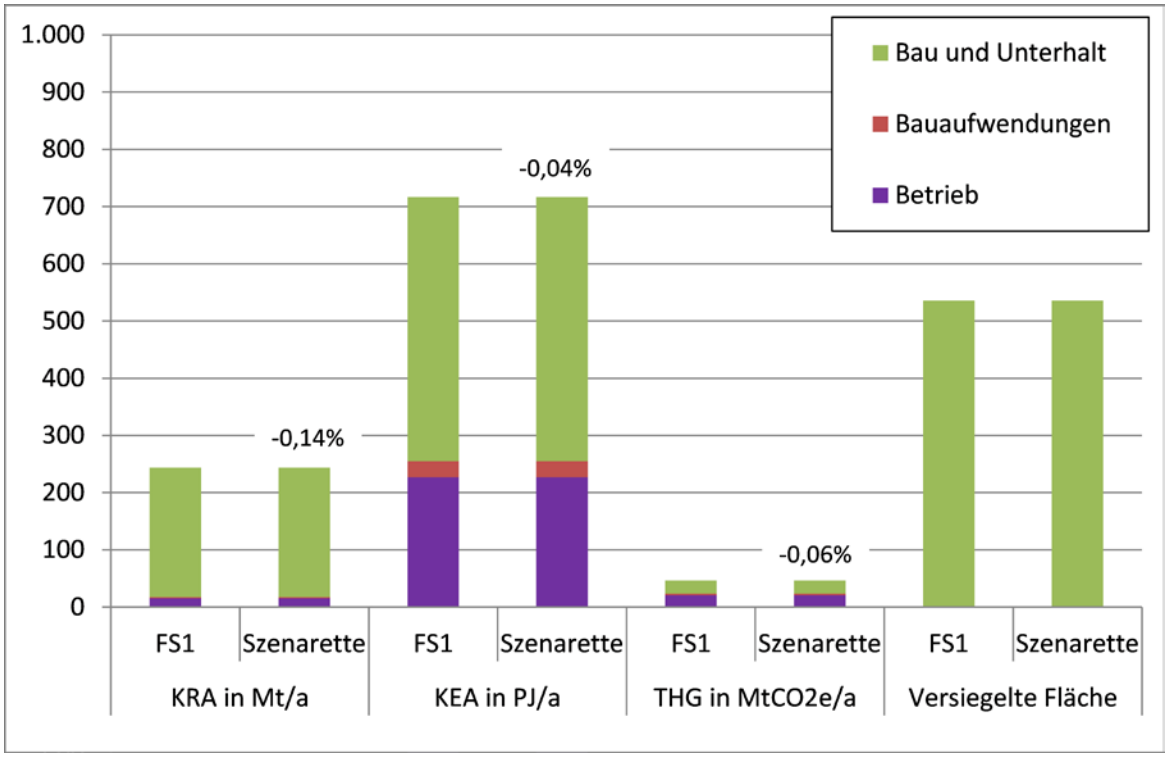
Als „Szenarette“ werden Varianten der in Teil C Kapitel 7 dargestellten Fallstudien bezeichnet. Auf Basis einer oder mehrerer Fallstudien werden einzelne Inputparameter z. B. der Infrastrukturbestand oder Materialkennwerte inhaltlich begründet variiert und die Abweichung der Ergebnisse gegenüber der jeweiligen Fallstudie dargestellt. Der wesentliche Unterschied zu den oben beschriebenen Sensitivitätsbetrachtungen besteht also darin, dass nicht die Unsicherheit der Eingangsdaten und getroffenen Annahmen beleuchtet wird, sondern alternative Ansätze der Infrastrukturausgestaltung und deren Auswirkungen auf die betrachteten Wirkungskategorien dargestellt werden.

### 3.3.1 Ressourcenleichte Kombination grauer und grün-blauer Infrastrukturen im dezentralen Regenwassermanagement

Mit dieser Szenarette wird untersucht, wie sich die insbesondere im Zuge des Klimawandels (Stichwort: Starkregen) notwendige Anpassung der Stadtentwässerungsinfrastruktur durch eine starke Priorisierung von dezentralen Regenwassermanagement-Maßnahmen, die auf grün-blaue statt auf graue, d. h. technische, kanalgebundene Infrastrukturen setzen, auswirkt. Die Grundlage stellt die Fallstudie Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen [FS 1] dar. Für die spätere Interpretation der Ergebnisse wird auch die Sensitivitätsanalyse 6 (Regenwasser) herangezogen.

In dieser Szenarette wurde angenommen, dass vor dem Hintergrund der Leitvorstellung eines möglichst weitgehenden dezentralen Managements von Niederschlagswasser (in Form eines Bündels an Maßnahmen der Retention, Versickerung, Verdunstung und Ableitung in städtische Gewässer) langfristig bis zum Jahr 2050 der Bedarf an den Infrastrukturkomponenten Regenkanalnetz, Regenüberlaufbecken und Regenklärbecken um 5 % reduzieren lässt.

Abbildung 115: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Ersatzes von grauer durch grüne Infrastruktur im dezentralen Regenwassermanagement“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Trotz der angenommen Reduktion des Infrastrukturbestandes (Abwasser) durch die Nutzung grüner/blauer Infrastrukturen für ein dezentrales Regenwassermanagement um 5 % ergeben sich nur geringfügige Abweichungen im Ergebnis. Der KRA liegt in der Szenarette um 0,3 Mt/a bzw. 0,14 % unter der Fallstudie. Der Einfluss des Einsatzes von grüner bzw. blaue Infrastruktur auf den KEA und die Treibhausgasemissionen ist mit 0,27 PJ/a (-0,04 %) und rund 30.000 t $CO_2$äq/a (-0,06 %) noch geringer.

Aufgrund der hohen Aggregationsebene des Berechnungsansatzes erlauben die Ergebnisse jedoch keine pauschale Schlussfolgerung, dass der Ersatz von grauer durch grüne Infrastruktur im dezentralen Regenwassermanagement aus Perspektive der Ressourcenleichtigkeit nicht zu empfehlen ist. Vielmehr ist im konkreten Fall und Standort eine kleinteilige Bewertung anzustellen, inwieweit dies in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten, des Zustandes der Infrastruktur und der zu erwartenden Zunahme von Starkregenereignissen dennoch eine Ressourcenleichte Option darstellt.

Für die Szenarette wurde bewusst ein Wert angenommen, der von einer radikalen Anpassung des Niederschlagswassermanagements ausgeht. In der Sensitivitätsanalyse 6 wurde ein stärkerer Ausbau der Abwassernetze und der Regenentlastungsanlagen berechnet, als dies im Referenzszenario unterstellt wird. Wichtigster Treiber ist der Klimawandel, der sich in Deutschland u. a. in Form von längeren Hitzeperioden und veränderten Niederschlagsregimen (insb. mehr Regenwasser in kürzerer Zeit) auswirken wird. Die aktuellen Diskussionen in der Branche gehen davon aus, dass den Folgen des Klimawandels am besten mit einer Kombination von baulich-technischen Maßnahmen (z. B. Regenkanalnetz, Regenrückhalte- und -überlaufbecken oder hydraulische Steuerung der Abflüsse im Netz) und dezentralen Maßnahmen (Retention, Versickerung, Verdunstung und Ableitung in städtische Gewässer) begegnet werden kann. In welchem Verhältnis die Maßnahmen zueinander stehen und mit welcher Gewichtung eher auf die eine oder andere grundlegende Strategie gesetzt wird, ist von lokalen Gegebenheiten und Leitbildern abhängig.

Auf Basis der angestellten, sehr groben Abschätzung sind die Effekte für Ressourcenleichtigkeit der Regenwasserinfrastrukturen gering. Die Vorteile der Kombination von grauen und grün-blauen Infrastrukturen liegen in anderen Bereichen (z. B. Kühlungseffekte durch Verdunstung, Freiraumqualität und Wasser als gestaltendes Element der Stadtentwicklung), die nicht Untersuchungsgegenstand des Vorhabens RELIS sind.

### 3.3.2 Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung

In den in Teil C Kapitel 2.3 und 2.4 dargestellten Fallstudien mit einem Schwerpunkt auf dem Verkehrssektor wird der Einfluss einer verstärkten Durchdringung von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten (Fallstudie 2: „Kopplung Verkehr – Energie“) bei gegenüber dem Referenzszenario unverändertem Verkehrsaufwand sowie der Einfluss einer Verkehrsverlagerung und -vermeidung (Fallstudie 3: „Innovationen im Verkehr“) auf die Ressourceninanspruchnahme untersucht.

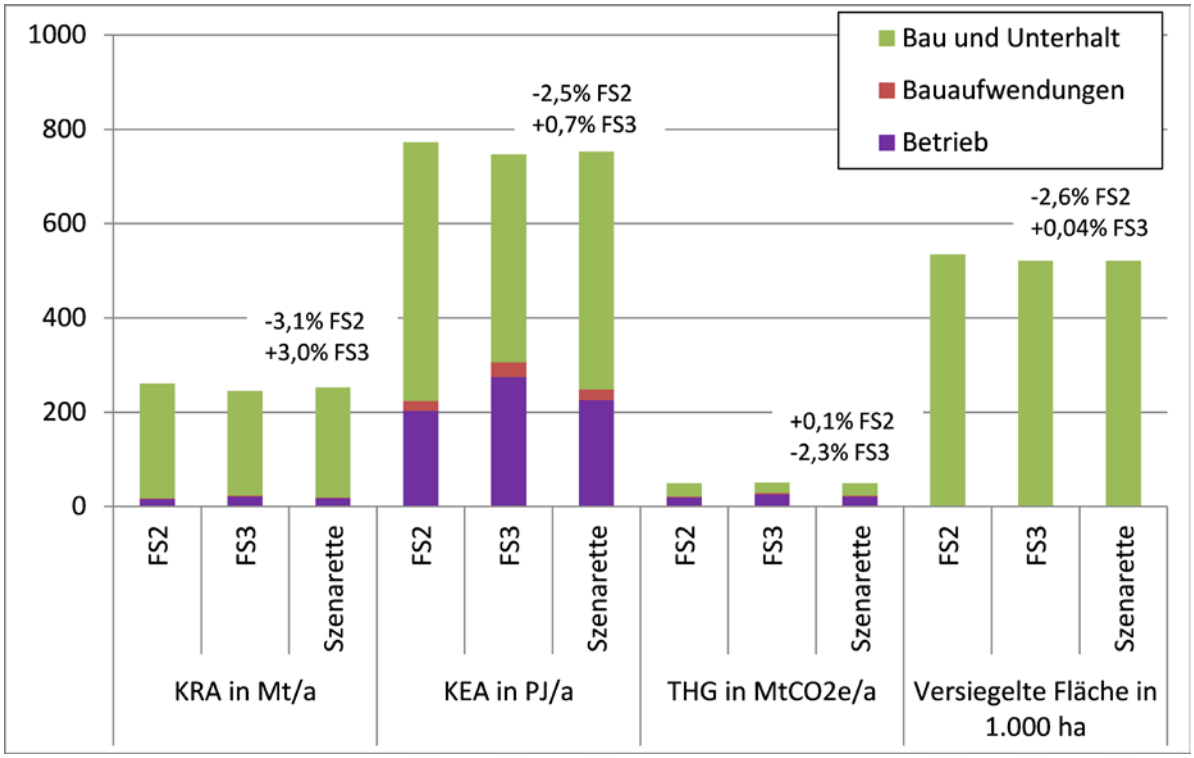
Diese Szenarette stellt eine Kombination aus diesen Fallstudien dar. In der Szenarette wird angenommen, dass aufgrund von IKT-basierten Lösungen Verkehr von der Straße auf die Schiene verlagert und vermieden wird, wodurch ein gegenüber dem Referenzszenario stärkerer Ausbau der Schieneninfrastruktur sowie IKT-Infrastruktur notwendig wird. Auf der anderen Seite fällt der Ausbau des Straßennetzes bis zum Jahr 2050 aufgrund der geringeren Verkehrsleistung und durch IKT-Lösungen wie Verkehrssteuerung zu Erhöhung der Kapazität geringer als im Referenzszenario aus. Durch eine starke Abnahme des Fahrzeugbestandes (PKW) von rund -25 % gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 stehen innerstädtische Stellplatzflächen anderen Nutzungsmöglichkeiten (z. B. Begrünung) zur Verfügung. Weiterhin wird ein Großteil des Straßenverkehrs im Jahr 2050 elektrisch erbracht. Dies erfordert zusätzliche Infrastrukturkomponenten wie Ladeinfrastruktur sowie ein Oberleitungsnetz auf den Bundesautobahnen. Für verbrennungsmotorische Fahrleistungsanteile werden stromgenerierte

Kraftstoffe eingesetzt. Die zusätzliche Stromnachfrage für die direkte Nutzung von Strom wird durch zusätzliche erneuerbare Erzeugungsanlagen in Deutschland gedeckt, wodurch im Energiesektor zusätzliche Anlagen und Netze errichtet werden müssen. Aufgrund des geringeren Verkehrsaufwandes (und Stromnachfrage) fällt dieser zusätzliche Ausbau in der Szenarette jedoch etwas geringer aus als in Fallstudie 2.

Diese Szenarette setzt damit auf dem Szenario KS 95 aus den Klimaschutzszenarien auf.

Abbildung 116 zeigt die betrachteten Wirkungsindikatoren im Jahr 2050 für die Szenarette im Vergleich zu den Fallstudien für den Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur. Bezüglich des KRA liegt die Szenarette im Jahr 2050 8 Mt/a (-3,1 %) unter der Fallstudie 2. Die neuen Infrastrukturkomponenten führen jedoch im Vergleich zur Fallstudie 3 zu einer höheren Ressourceninanspruchnahme (+7,4 Mt/a bzw. +3,0 %). Ein ähnliches Bild ergibt sich beim KEA, bei dem die Szenarette mit 753 PJ/a rund 20 PJ/a unter Fallstudie 2 (-2,5 %) aber rund 5 PJ/a über (+0,7 %) Fallstudie 3 liegt.

Abbildung 116: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Verkehrsverlagerung, -vermeidung und verstärkte Elektrifizierung“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Bezüglich der Treibhausgasemissionen ergibt sich ein anderes Bild. Die gesamten Emissionen durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur liegen im Jahr 2050 in der Szenarette in etwa auf dem Niveau von Fallstudie 2, jedoch mit rund 50 Mt $CO_2$-Äquivalente pro Jahr über 1 Mt/a (-2,3 %) unter Fallstudie 3. Dabei kommen zwei Effekte zum Tragen. Zum einen führten die zusätzlichen Infrastrukturkomponenten zu höheren Emissionen in der Szenarette im Vergleich zu Fallstudie 3. Dies wird jedoch überkompensiert durch einen veränderten Strommix durch die zusätzlichen erneuerbaren Erzeugungsanlagen, welcher für die Berechnung der Bauaufwendungen und des Betriebes herangezogen wird. Durch den höheren Anteil an erneuerbar erzeugtem Strom im Strommix sinkt

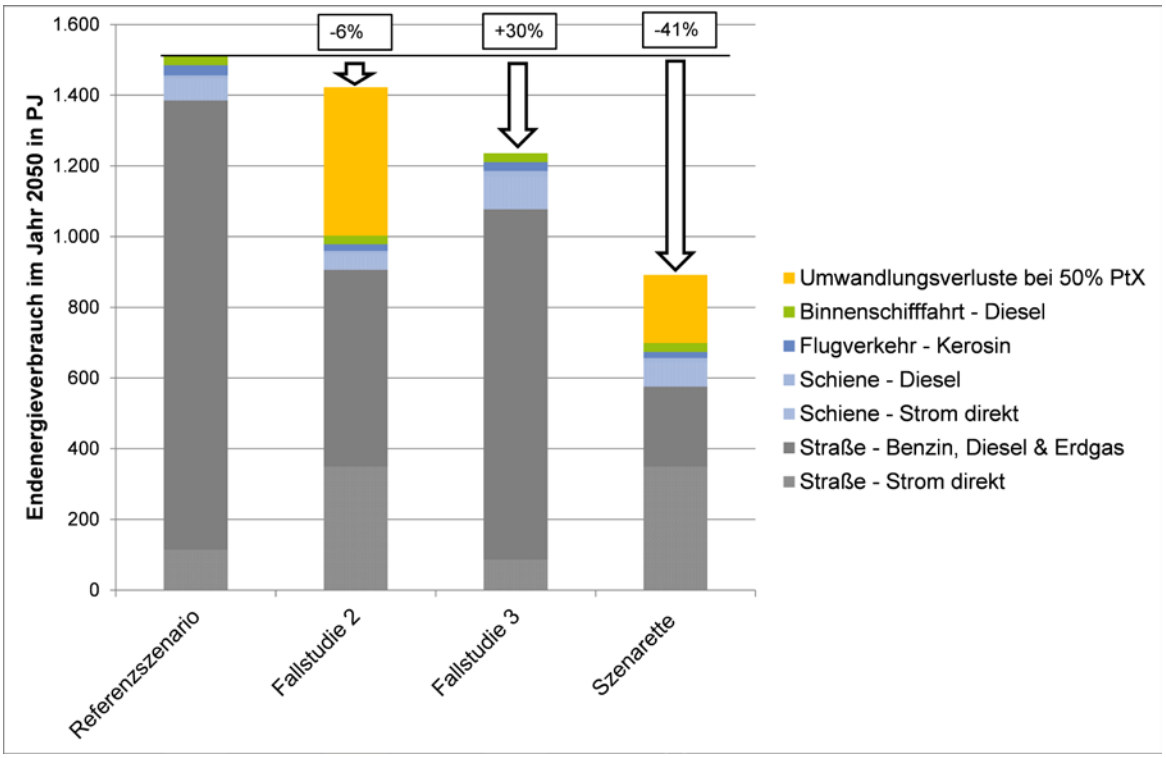
der Emissionsfaktor, tatsächlich werden absolut jedoch nicht weniger Treibhausgase emittiert, sondern nur auf eine größere Stromnachfrage allokiert.

Hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme (versiegelte Fläche) liegt die Szenarette mit 521.000 ha deutlich unter Fallstudie 2 (-2,6 %). Die neuen Infrastrukturkomponenten führen in der Szenarette um eine leicht höhere Flächeninanspruchnahme als in Fallstudie 3.

Nicht in der Abbildung dargestellt ist der fahrzeugseitige Energieverbrauch. Aufgrund der höheren Energieeffizienz der Fahrzeuge mit alternativen Antriebskonzepten wie z. B. batterieelektrische Fahrzeuge, Plug-In-Hybridfahrzeuge und Oberleitungs-Hybrid-Lkw sinkt der Endenergiebedarf in der Szenarette sowohl gegenüber der Fallstudie 2 durch die geringere Fahrleistung als auch gegenüber Fallstudie 3 durch die höhere Energieeffizienz (Antriebskonzepte, Verlagerung auf die Schiene).

Wie der Exkurs in Teil C Kapitel 2.4.5 und Abbildung 117 zeigen liegt der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor in der Szenarette mit rund 900 PJ/a (inkl. Umwandlungsverluste bei 50 % PtX Einsatz) 41 % unter dem Referenzszenario. Die Einsparung von rund 620 PJ/ist erheblich und übersteigt z. B. den KEA aus dem Betrieb der Infrastruktur um das Dreifache.

Abbildung 117: Endenergieverbrauch im Verkehrssektor im Jahr 2050




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Weiterhin führt ein geringerer Fahrzeugbestand im Vergleich zum Referenzszenario und der Fallstudie 2 zu einer geringeren Ressourceninanspruchnahme. Gegenüber der Fallstudie 3 ist auf Fahrzeugseite hingegen mit einer zusätzlichen Inanspruchnahme, insbesondere durch die neuartigen Fahrzeugkomponenten wie Fahrzeugbatterien und Elektromotoren zu rechnen. Im Exkurs in Teil C Kapitel 2.3.5 werden KRA, KEA sowie THG-Emissionen der mit dem Materialbedarf der Fahrzeuge einhergehenden Ressourceninanspruchnahme abgeschätzt. Die Tabelle 20 zeigt die ergebnisse der Abschätzung für die Fallstudie „Kopplung Energie – Verkehr“ (Fallstudie 2), „Innovationen im Verkehr“ (Fallstudie 3) und diese Szenarette. Bei den mit den Fahrzeugen verbundenen Umweltauswirkungen liegt die Szenarette zwischen den beiden Fallstudien und deutlich über dem Referenzszenario (KRA +31 %, KEA +17 %, THG +17 %)

Tabelle 20: KRA-, KEA- und THG-Emissionen durch Materialbedarfe neuzugelassener Fahrzeuge im Jahr 2050

| Wirkungs-kategorie | Einheit | Fallstudie 2 | Fallstudie 3 | Szenarette |
|---|---|---|---|---|
| KRA | *Mt/a* | 50 | 29 | 46 |
| KEA | *PJ/a* | 337 | 215 | 300 |
| THG | *Mt $CO_2$ äq/a* | 21 | 14 | 19 |

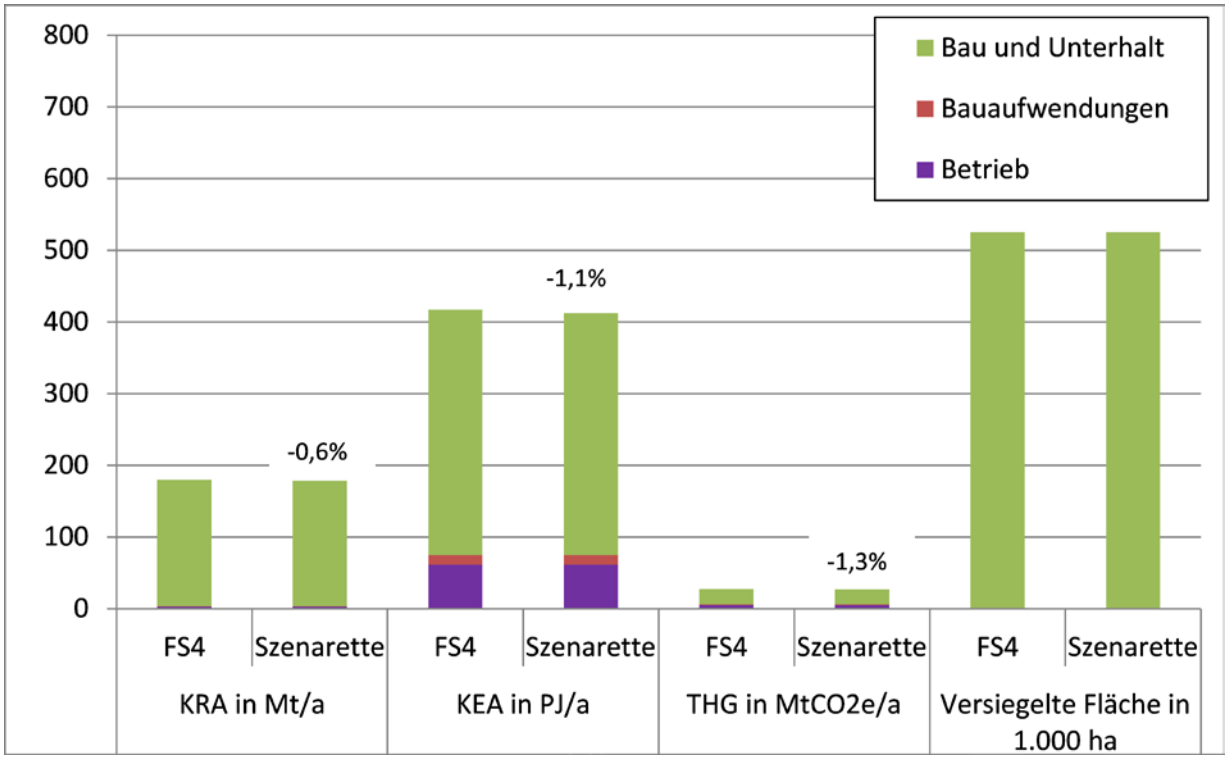
Quelle: Eigene Berechnung.

Diese Szenarette macht deutlich, dass eine ressourcenleichte Ausgestaltung des Verkehrssektors sowohl technische als betriebliche Ansätze verfolgen sollte. In Hinblick auf die Systemgrenzen werden zwar nur leichte Reduktionen der Ressourceninanspruchnahme erzielt. Betrachtet man die Reduktion des Energieverbrauches während der Nutzung der Fahrzeuge, ermöglicht diese Form der Umgestaltung jedoch das Heben von großen Potenzialen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme.

### 3.3.3 Errichtung von Windkraftanlagen als Gitternetztürme

Diese Szenarette setzt auf die Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“(Fallstudie 4) auf. Während die Onshore Windkraftanlagen in der Fallstudie auch im Jahr 2050 ausschließlich in Form von Rohrmanteltürmen errichtet sind, wird in dieser Szenarette das Prinzip des Ökodesign angewendet und davon ausgegangen, dass ab dem Jahr 2030 die Bauform des Gitternetzturmes gewählt wird. Dadurch kann der Bedarf an Stahl um rund 50 % reduziert werden (Gasch/Twele 2010).

Abbildung 118: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Errichtung von Windkraftanlagen als Gitternetztürme“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Abbildung 118 zeigt die Betrachteten Wirkungsindikatoren im Jahr 2050 für die Szenarette im Vergleich zur Fallstudien „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ für den Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur. Der KRA in der Szenarette liegt im Jahr 2050 1,0 Mt/a (-0,6 %) unter der Fallstudie. Auch in Hinblick auf KEA und THG wird deutlich, dass der Einsatz von Gitternetztürmen eine ressourcenleichte Option darstellt. Mit 412 PJ/a liegt der KEA rund 5 PJ/a unter der Fallstudie (-1,1 %). Die Treibhausgasemissionen liegen in der Szenarette im Jahr 2050 ebenfalls 1,3 % geringer als in der Fallstudie, wobei die Emissionen absolut um rund 0,4 Mt $CO_2$-Äquivalente pro Jahr geringer ausfallen. Hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme gibt es keine Änderung.

Betrachtet man ausschließlich den Bau- und Unterhalt, die Bauaufwendungen und den Betrieb der Energieversorgungsinfrastruktur zeigt sich, dass diese Maßnahme durchaus geeignet ist zur Umgestaltung des Energiesektors in Hinblick auf Ressourcenleichtigkeit. Aus dieser Perspektive liegt der KRA 2,2 %, der KEA 3,0 % und die Treibhausgasemissionen 3,2 % niedriger als in der Fallstudie.

Diese Szenarette verdeutlicht, dass es im Rahmen der Fallstudie 4 weitere sinnvolle, punktuelle Ansatzpunkte bzw. Einzelmaßnahmen für Ressourcenleichtigkeit gibt. Die Einsparungen in dieser Szenarette würden zudem größer ausfallen, wenn sie sich auf eine Fallstudie beziehen würde, in der ein weiterer Ausbau der Windkraftanlagen unterstellt wird (z. B. Fallstudie 2).

### 3.3.4 Ausbau IKT-Netz langfristig mittels Glasfaser statt Kupfer

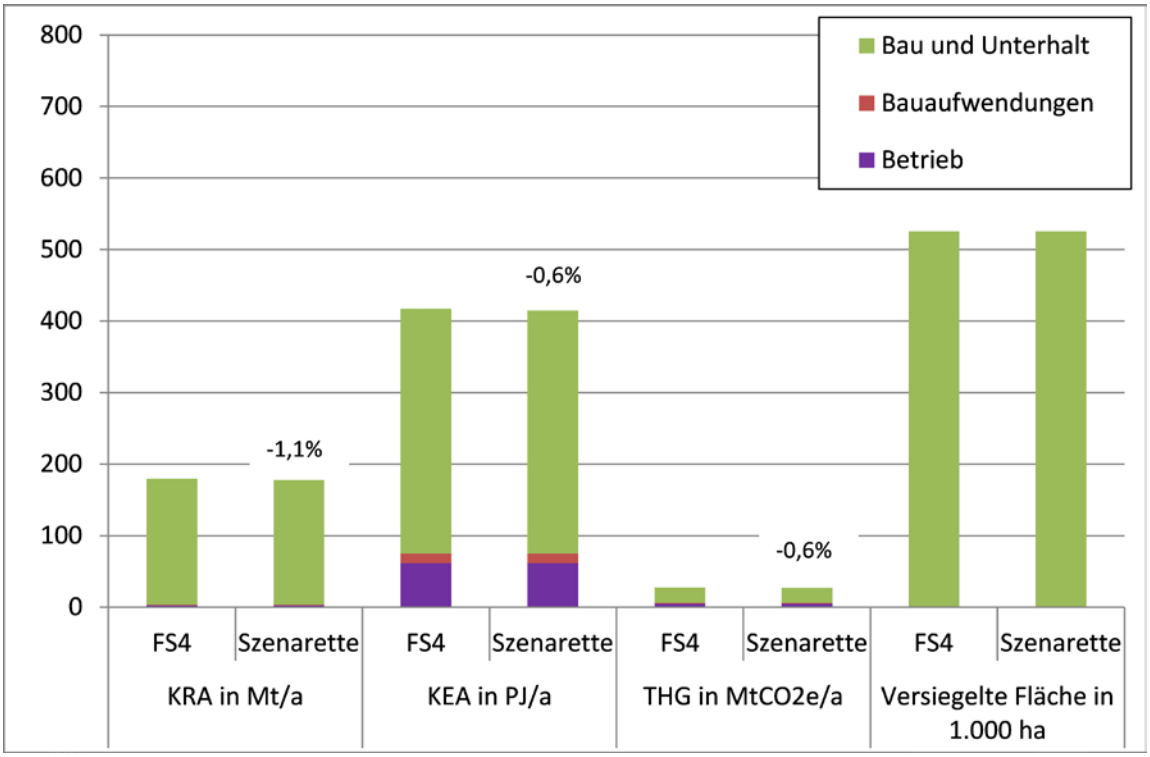
Diese Szenarette setzt auf die Fallstudie „ Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ auf, in der auch langfristig noch ein bedeutender Teil des IKT-Netzes auf Kupferkabeln basiert. Davon abweichend wird in der Szenarette davon ausgegangen, dass der zukünftige Ausbau und Ersatz der bestehenden Infrastruktur bis 2030 überwiegen und ab 2030 ausschließlich durch Glasfaser umgesetzt wird.

Betrachtet man ausschließlich den Bau- und Unterhalt, die Bauaufwendungen und den Betrieb der IKT-Infrastruktur scheint es, dass diese Maßnahme geeignet ist zur ressourcenleichten Umgestaltung der IKT-Infrastruktur. Bezogen auf die IKT-Infrastruktur liegt der KRA 41 %, der KEA 8 % und die Treibhausgasemissionen 8 % niedriger als in der Fallstudie. Der große Einfluss auf den KRA ergibt sich durch der hohen Materialvorleistung des Kupfers im Vergleich zur Glasfaser.

Absolut ist jedoch der Anteil des IKT-Sektors an der gesamten Ressourceninanspruchnahme gering, wodurch sich diese starke Minderung nur leicht auf das Gesamtergebnis durchschlägt. Dies wird in Abbildung 119 deutlich, welche die betrachteten Wirkungsindikatoren im Jahr 2050 für die Szenarette im Vergleich zur Fallstudien „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ für den Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur zeigt. Der KRA in der Szenarette liegt im Jahr 2050 1,9 Mt/a (-1,1 %) unter der Fallstudie. Auch in Hinblick auf KEA und THG wird deutlich, dass der Einsatz von Glasfasernetzen eine ressourcenleichte Option darstellt. Mit 415 PJ/a liegt der KEA 2,3 PJ/a unter der Fallstudie (-0,6 %). Die Treibhausgasemissionen liegen in der Szenarette im Jahr 2050 ebenfalls 0,6 % niedriger als in der Fallstudie, wobei die Emissionen absolut um rund 0,2 Mt $CO_2$-Äquivalente pro Jahr geringer ausfallen. Keinen Unterschied (?) gibt es hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme.

Da die IKT-Infrastruktur häufig dafür benötigt wird, in anderen Bereichen Ressourceneffizienzpotenziale zu erschließen (bspw. in Fallstudie 3 „Innovationen im Verkehr“), sollte eine Ausgestaltungsvariante gewählt werden, die diesen Zweck am besten erfüllt. Sofern jedoch eine auf Glasfaser aufbauende Variante den gleichen Nutzen wie eine auf Kuper basierenden Variante erfüllt, scheint diese in Hinblick auf die betrachteten Kriterien vorteilhaft.

Abbildung 119: KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche durch Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb im Jahr 2050 in der Szenarette „Ausbau IKT-Netz langfristig mittels Glasfaser statt Kupfer“




Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 3.4 Zeitpunkte der Systemanpassung

Der Zeitpunkt der Umgestaltung der Infrastruktursysteme kann einen Einfluss auf die im Rahmen der orientierenden Stoffstromanalyse betrachteten Wirkungskategorien besitzen. Aufgrund der verwendeten Methodik können sich Abweichungen der Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse durch eine Änderung der Zeitpunkte des Beginns der Systemanpassungen aufgrund von zwei Effekten ergeben. Zum einen können diese in den betrachteten Zeitscheiben zu einem abweichendem Infrastrukturbestand führen. In Infrastrukturbereichen mit einem zunehmenden Bestand (z. B. Straßenverkehrsinfrastruktur) führt ein verzögerter Ausbau der Infrastruktur zu einer Verringerung der Ressourceninanspruchnahme, da der Bestand bei einer Verzögerung in einigen Zeitscheiben niedriger ist. In Bereichen, in denen der Bestand zurückgeht (z. B. Braunkohleverstromung) führt eine Verzögerung hingegen zu einem höheren Bestand in einige Zeitscheiben. Dies führt dort in Hinblick auf Bau und Unterhalt zu einer höheren Ressourceninanspruchnahme. Die Ursache liegt in der Verwendung von statischen Wirkungsfaktoren.

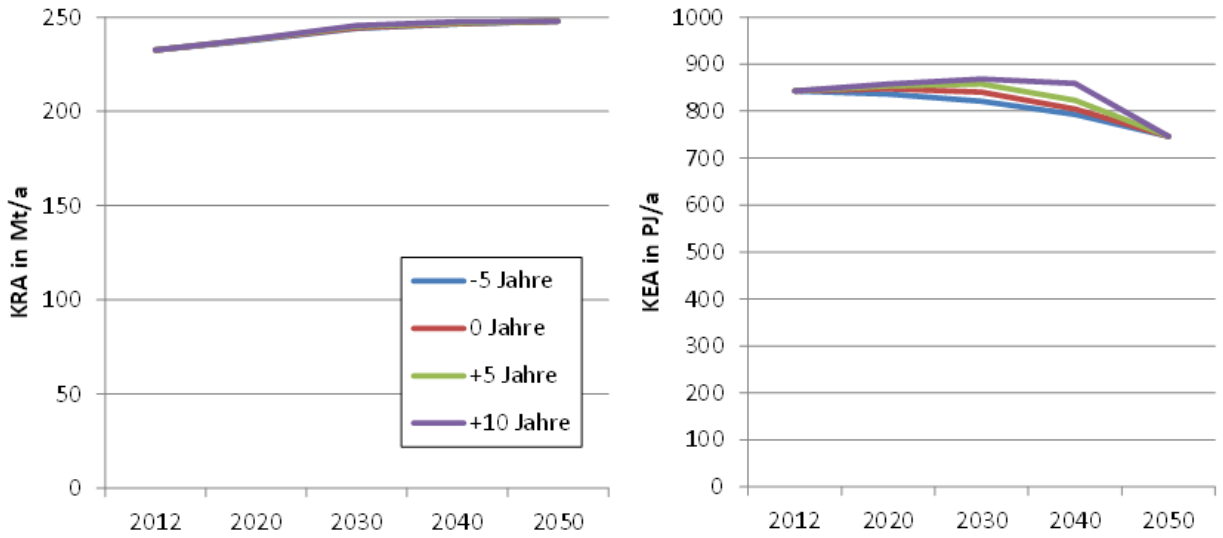
Zum anderen wird für den verbrauchten Strom (Bauaufwand, Betrieb) der unterstellte Kraftwerksbestand berücksichtigt und für die Jahresscheiben spezifische Faktoren für KRA, KEA und THG errechnet. Auch für die Darstellung der außerhalb der Systemgrenzen liegenden Nutzungsphase der fossilen Erzeugungsanlagen werden diese dynamischen Faktoren herangezogen. Dadurch führt bspw. ein geringerer Anteil an Kohlestrom zu einer Verringerung der Ressourceninanspruchnahme bei Bauaufwendungen und Betrieb der Straßenverkehrsinfrastruktur.

Von besonders hoher Relevanz ist deshalb der Infrastrukturbereich „Energieversorgung“, für dem im Weiteren bespielhaft der Einfluss des Zeitpunktes der Systemanpassung auf die betrachteten Wirkungskategorien dargestellt wird. Dabei wird gegenüber dem Referenzszenario von einem identischen

Mengengerüst der Energieinfrastruktur im Jahr 2012 sowie 2050 ausgegangen. Der Bestand des mittleren Stützjahres (2030) wird jedoch entweder durch einen beschleunigten Ausbau bereits im Jahr 2025 erreicht (-5 Jahre) oder durch einen verzögerten Ausbau erst im Jahr 2035 (+5 Jahre) bzw. im Jahr 2040 (+10 Jahre) erreicht. Die Bestände in den weiteren Jahresscheiben werden durch lineare Interpolation ermittelt.

Abbildung 120 zeigt den KRA und KEA im Referenzszenario als Summe über alle Infrastrukturbereiche für unterschiedliche Zeitpunkte der Umgestaltung des Sektors Energie. Die Flächen zwischen den verschiedenfarbigen Kurven stellen die akkumulierten Abweichungen dar. Der Einfluss der Umgestaltung des Energiesektors auf den KRA ist eher gering. Der größte Unterschied des akkumulierten KRA (Fläche zwischen den Kurven -5 Jahre und+10 Jahre) beträgt 13 Mt bzw. 0,3 %. Hinsichtlich des KEA zeigt sich, dass eine beschleunigte Umgestaltung des Energiesektors die Ressourceninanspruchnahme merklich reduziert. Im Maximum beträgt die Differenz (akkumuliert) rund 1.300 PJ bzw. 4 % bezogen auf das Referenzszenario.

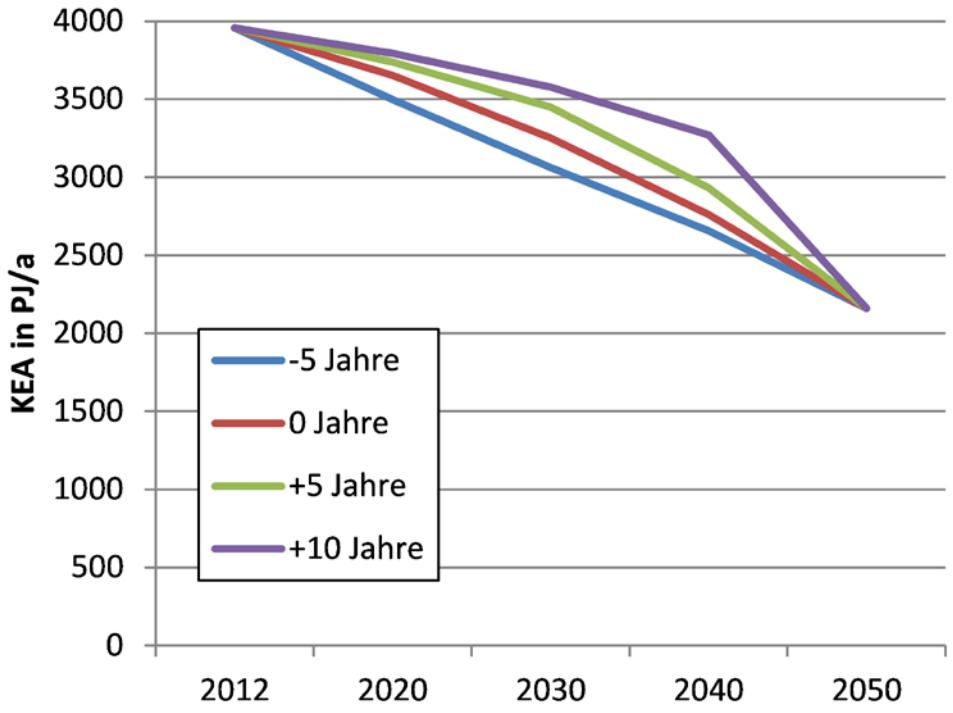
Abbildung 120: KRA (links) und KEA (rechts) durch Bau und Instandhaltung, Bauaufwendungen und Betrieb für verschiedene Ausbaupfade des Sektors Energie




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Eine zeitliche Anpassung der Umgestaltung des Energiesektors hat darüber hinaus durch die veränderten Mengen genutzter fossiler Energieträger einen deutlichen Effekt auf die Nutzungsphase. Abbildung 121 zeigt den KEA einschließlich der Nutzung des fossilen Kraftwerkspark (Verbrennung von Braunkohle, Steinkohle und Erdgas). Für das Referenzszenario beträgt die Differenz zwischen -5 Jahre und +10 Jahre in diesem Fall 13.900 PJ bzw. 12 %. Eine gegenüber dem Referenzszenario um 5 Jahre beschleunigte Umgestaltung führt bis zum Jahr 2050 zu einer akkumulierten Einsparung von 4.300 PJ (4 %), eine Verzögerung um 5 Jahre führt zu einem um 4.500 PJ höherem KEA.

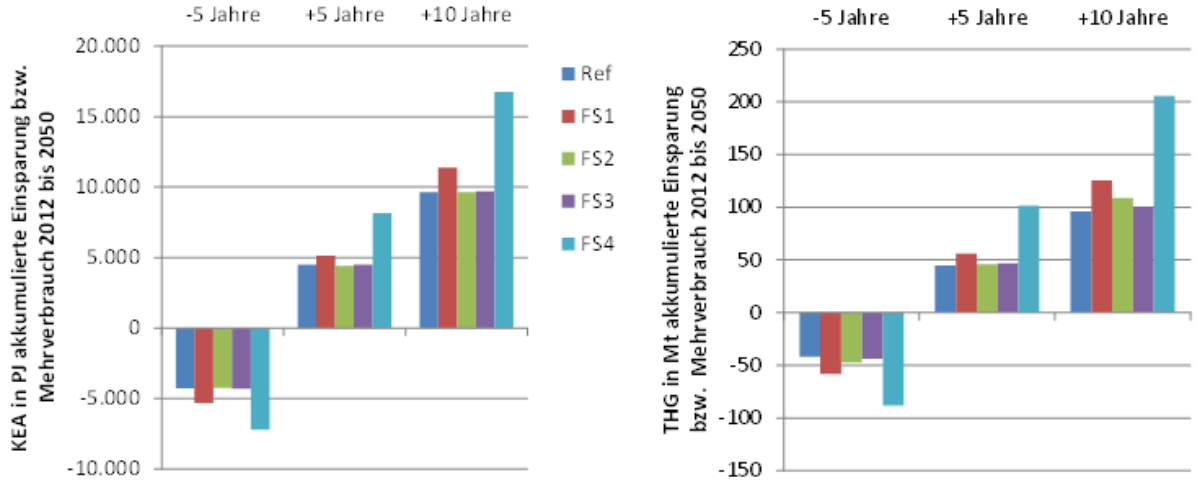
Abbildung 121: KEA durch Bau und Instandhaltung, Bauaufwendungen, Betrieb und Nutzung für verschiedene Ausbaupfade des Sektors Energie




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Ähnliche Effekte lassen sich bei veränderten Zeitpunkten der Systemanpassung des Energiesektors in den vier Fallstudien beobachten (s. Abbildung 122). In der Abbildung sind neben dem KEA auch die Treibhausgasemissionen (kumulierte Abweichung gegenüber dem Referenzszenario) in den Fallstudien gegenüber den in Teil C Kapitel 7 dargestellten Ergebnissen aufgeführt.

Abbildung 122: KEA (links) und THG (rechts) durch Bau und Instandhaltung, Baustellenaufwand, Betrieb und Nutzung für verschiedene Ausbaupfade des Sektors Energie




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Durch eine um 5 Jahre beschleunigte Anpassung ergibt sich ein THG-Einsparpotenzial von rund 40–90 Millionen Tonnen $CO_2$-Äquivalente. Besonders stark ist de Effekt in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ [FS 4], da dort eine deutliche Erhöhung der Energieeffizienz unterstellt wird, die zu Lasten der fossilen Erzeugungsanlagen geht (geringere Kohlestromerzeugung gegenüber dem Referenzszenario).

Der Einfluss des Zeitpunktes der Umgestaltung des Energiesektors kommt insbesondere durch den Betrieb der fossilen Stromerzeugungsanlagen (Eigenverbrauch der Kraftwerke) sowie die Nutzungsphase (Stromerzeugung aus fossilen Erzeugungsanlagen) zustande und betrifft insbesondere den KEA und die Treibhausgasemissionen. Darüber hinausgehende Effekte z. B. beim KRA sind eher vernachlässigbar.

# 4 Schlussfolgerungen aus den Analysen der Szenarien

Die Analysen in den vorangegangenen Kapiteln geben einen Überblick über die Ressourceninanspruchnahme (kumulierter Rohstoffaufwand, kumulierter Energieaufwand, Treibhausgasemissionen und Flächeninanspruchnahme) durch den Infrastrukturbestand im Jahr 2012 und deren mögliche Entwicklung bis zum Jahr 2050 in einem Referenzszenario (Kapitel 1.2). Weiterhin zeigen die Untersuchungen von vier Fallbeispielen (Szenarien) (Kapitel 2) und darauf aufbauenden Szenaretten (Kapitel 3.3) einer ressourcenleichten Infrastrukturausgestaltung, wie sich die Umsetzung von konkreten Maßnahmen auf die Ressourceninanspruchnahme und die Kosten der Infrastruktursysteme auswirken können und wie die Fallstudien in Hinblick auf die gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe, Flexibilität, Resilienz und Reversibilität bewertet werden können (Kapitel 2). Darüber hinaus wurden Hemmnisse bei der Anpassung und Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme diskutiert (Kapitel 3.1) und betrachtet, welche Zeitpunkte aus Sicht der Ressourcenleichtigkeit für eine Systemanpassung der Energieinfrastruktur geeignet sind (Kapitel 3.4).

Hier sollen nun die zentralen Schlussfolgerungen aus diesen Ergebnissen herausgearbeitet werden. Dabei geht es nicht darum, die vier Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen in ein Ranking zu bringen im schlichten Sinne von „Fallstudie X ist ressourcenleichter als Fallstudie Y“. Die Szenarien bilden nur fünf von unendlich vielen möglichen Zukünften, d. h. künftigen Gestaltungen von Infrastrukturen und ihrer Rahmenbedingungen, ab. Mit den folgenden Schlussfolgerungen können aber die wichtigsten Ergebnisse und Auffälligkeiten benannt werden, um hieraus wiederum Empfehlungen (vgl. Teil E) ableiten zu können.

Die folgenden Ergebnisse der Untersuchungen im Vorhaben RELIS sind sortiert nach Erkenntnissen in Bezug auf (1) die Ressourceninanspruchnahme, (2) die Kostenabschätzungen, (3) die Gestaltung von ressourcenleichten Infrastrukturen und (4) methodische Hinweise und Erkenntnisse aus der Bearbeitung.

1. Ergebnisse in Bezug auf die Ressourceninanspruchnahme:

- Der aktuelle Bestand an technischer Infrastruktur in Deutschland ist enorm. Im Infrastrukturbestand ist ein umfangreiches anthropogenes Lager mit einem damit verbundenen großen „Material-, Energie- und Flächenrucksack“ angelegt. Der hohe aktuelle Bestand wird auch zukünftig zu einer hohen Ressourceninanspruchnahme führen. In vielen Infrastrukturbereichen (z. B. dem Straßennetz, der Infrastruktur der Informations- und Kommunikationstechnologie) wird ein weiterer Netzausbau diese zukünftige Ressourceninanspruchnahme weiter erhöhen.
- Auch zeigen die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse, dass es eine Reihe an Maßnahmen gibt, mit denen sich die Ressourceninanspruchnahme (KRA, KEA, THG und Flächeninanspruchnahme) der Infrastruktursysteme verringern lässt. Dabei ist es wichtig die gesamten Umweltauswirkungen einschließlich Bau und Unterhalt, Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur im Blick zu behalten. Teilweise führen die umgesetzten Maßnahmen bei Bau und Unterhalt der Infrastruktur zu einer höheren Ressourceninanspruchnahme (vgl. die Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“), ermöglichen jedoch auf Seiten des Betriebes eine Verbesserung. In anderen Fällen werden zwar Einsparungen auf Seiten der Treibhausgasemissionen erreicht, bei den anderen betrachteten Wirkungskategorien erhöhen sich hingegen die Umweltauswirkungen (vgl. die Fallstudien „Kopplung Energie – Verkehr“ und „Innovationen im Verkehr“), so dass bei der Umgestaltung der Infrastruktursysteme Zielkonflikte bestehen können.
- In Bezug auf Bau und Unterhalt der Infrastruktursysteme zeigt sich, dass in den gewählten Konstellationen der Fallstudien die Veränderungen der Ressourcenparameter im Vergleich der verschiedenen Szenarien in der Gesamtbetrachtung der Ergebnisse und auf dem hochaggregierten Niveau auf den ersten Blick gering sind. Bei einer genaueren Betrachtung der Details in

den einzelnen Sektoren und Teilsystemen zeigen sich jedoch interessante Unterschiede zwischen den Szenarien. Der Verkehrssektor besitzt an allen betrachteten Wirkungskategorien den größten Anteil. Innerhalb des Verkehrssektors wiederum schlagen die Straßenverkehrsinfrastrukturen am stärksten zu Buche. Die Ressourceninanspruchnahme durch die Energieinfrastrukturen hängt stark mit den Energiebedarfen zusammen. Die Infrastrukturen der Siedlungswasserwirtschaft sind aufgrund ihrer vergleichsweise langen Nutzungsdauer (v.a. in den Netzen) einerseits (bilanziell) vergleichsweise „ressourcenleicht", andererseits relativ stabil in ihrer Gestaltung. Die IKT-Infrastrukturen repräsentieren in den Parametern nur sehr geringe Anteile.

- Die durch den Ausbau der Infrastruktur bedingte Ressourceninanspruchnahme muss nicht zwangsläufig negativ bewertet werden. So können Infrastrukturen auch die Grundlage für eine ressourcenleichte Nutzung der Infrastrukturen darstellen (z. B. Ausbau der Schienenverkehrsinfrastruktur ermöglicht einen energieeffizienteren Verkehr) oder ein ressourcenleichtes Verhalten ermöglichen (z. B. Ausbau der IKT-Infrastruktur ermöglicht multimodale Mobilität). Auf Seiten der Nutzung können ggf. deutlich höhere Potenziale zur Ressourcenleichtigkeit gehoben werden, als durch die Infrastruktur an sich an (zusätzlicher) Ressourceninanspruchnahme verursacht wird. Damit haben, wie insbesondere die Fallstudien „Verkehr – Energie" und „Innovationen im Verkehrsbereich" sowie die Szenarette 2 zeigen, Infrastrukturgestaltungen eine Ermöglichungsfunktion für einen ressourcenleichten Betrieb und eine ressourcenleichte Nutzung. Auch wenn durch neue Komponenten (z. B. Oberleitungsinfrastruktur) oder Netzausbau (z. B. IKT-Infrastruktur) die Ressourceninanspruchnahme steigt, kann dies wie oben dargestellt eine weitaus stärkere Minderung in ihrer Nutzung ermöglichen.
- Aufgrund der hohen Anteile der Straßenverkehrsinfrastruktur an der gesamten Ressourceninanspruchnahme besitzen dort umgesetzte Maßnahmen eine hohe Wirkmächtigkeit. Dies verdeutlichen die Ergebnisse in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz". Die in dieser Fallstudie angelegten Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft (Recycling) für die Baumaterialien (insb. Asphalt) der Infrastrukturen zeigen hohe Potenziale für mehr Ressourcenleichtigkeit, insbesondere in Hinblick auf den kumulierten Energieaufwand. Die verstärkte Verwendung von Sekundärmaterialien (z. B. Asphalt, Kupfer) und die Erhöhung der Nutzungsdauern können demnach helfen, die jährlichen Auswirkungen zu reduzieren. Dieser Aspekt ist von besonders hoher Relevanz, weil sich Potenziale nicht nur in allen sich verändernden Infrastrukturbeständen (z. B. Netzerweiterungen) auswirken, sondern fast der gesamte Bestand durch die Instandhaltung und Erneuerung adressiert wird. Wie die Sensitivitätsbetrachtungen zeigen, führt jedoch der hohe Anteil der Straßenverkehrsinfrastruktur dazu, dass sich in den Berechnungen getroffene Annahmen zum Asphaltrecycling stark auf das Gesamtergebnis durchschlagen. Das skizzierte hohe Potenzial sollte in zukünftigen Untersuchungen (Forschungsvorhaben) weiter beleuchtet werden.
- Von besonderer Bedeutung ist die Umgestaltung der Infrastruktur der Energieversorgungssysteme. Diese Umgestaltung ist in einem beschränkten Maße bereits im Referenzszenario angelegt. Dies führt auf der Seite des Betriebes der Energieversorgungsinfrastruktur zu einer reduzierten Ressourceninanspruchnahme durch den zurückgehenden Bestand an Braun- und Steinkohlekraftwerken. Der Betrieb spiegelt in diesem Fall die mit der Höhe des Eigenverbrauchs verbundenen fossilen Energieträger wider. Der Ausbaupfad von Erneuerbare-Energie-Erzeugungsanlagen schlägt sich auch auf die anderen Infrastrukturbereiche durch, bei denen der im Bau und Betrieb eingesetzte Strom ressourcenleichter wird. Wie die Betrachtungen in Kapitel 3.4 zeigen, führt ein schnellerer Rückgang an fossilen Erzeugungsanlagen in den Fallbeispielen zu akkumulierten Emissionsminderung von 40 bis 90 Mio. t $CO_2$-Äquivalenten. Andererseits besteht das Risiko, dass durch einen verzögerten Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor die Ressourceninanspruchnahme in allen Infrastruktursektoren weiter erhöht werden könnte.

2. Ergebnisse in Bezug auf die Kostenabschätzung:

- Die Kostenabschätzungen für die einzelnen Szenarien zeigen, dass in keiner der modellierten Fallstudien gegenüber dem Referenzszenario Kostenentwicklungen zu erwarten sind, die einer Weiterentwicklung in der beschriebenen Richtung grundsätzlich entgegenstünden.
- Dabei ist allerdings noch einmal anzumerken, dass die durch die Nutzung der Infrastruktur bei den Nutzenden entstehenden Kosten aufgrund der Systemgrenzen nicht einbezogen wurden. Die Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ würde bei Berücksichtigung der fossilen Energieträger für die Stromerzeugung und unter der Annahme steigender Preise eine noch deutlichere Kostensteigerung gegenüber dem Referenzszenario aufweisen.
- Die Schätzung der Kostenentwicklung erfolgte unter der Grundprämisse, dass eine Umgestaltung der Infrastruktursysteme immer dann erfolgt, wenn Teile der Anlagen ohnehin ersetzt werden müssen. Werden stattdessen eigentlich noch nutzbare Anlagen durch neue ersetzt, geht der vorhandene Restwert der Anlagen verloren. Dies führt zu höheren Kosten für die Umgestaltung insgesamt.
- Eine weitere Grundprämisse ist, dass sich die spezifischen Betriebskosten der bereitgestellten Infrastruktur nicht wesentlich verändern. Es ist jedoch durchaus anzunehmen, dass die unterschiedlichen Technologien mit unterschiedlichen Aufwendungen beispielsweise für Wartung verbunden sind. In den betrachteten Fallbeispielen ist dies insbesondere für den Ausbau der erneuerbaren Energien relevant. Wenn der damit verbundene Technologiewechsel höhere spezifische Betriebskosten je installierter Leistungseinheit verursacht, würde sich die bereits beobachtete Kostensteigerung in diesem Teilsystem entsprechend verstärken. Aufgrund der bestehenden Datenlage konnte dieser Aspekt in der Kostenschätzung nicht befriedigend abgedeckt werden. Allerdings lässt das geringere Gewicht der Betriebskosten gegenüber den Kapitalkosten keine grundsätzlich anderen Ergebnisse in Bezug auf die Kostenwirkungen der ressourcenleichten Gestaltung der Infrastruktur erwarten.

3. Ergebnisse in Bezug auf die Gestaltung von ressourcenleichten Infrastruktursystemen:

- Eine Umgestaltung der Infrastruktursysteme in Richtung Ressourcenleichtigkeit ist vor dem Hintergrund der Komplexität der Systeme und der technischen, ökonomischen und mentalen Pfadabhängigkeiten (genannt seien bspw. nur die langen Abschreibungszeiträume) eine große Herausforderung. Zugleich ist bei der Umgestaltung der Infrastruktursysteme kritisch zu prüfen, welche neuen Pfadabhängigkeiten eingeschlagen werden und welche Möglichkeitsfenster für die Zukunft mit heutigen Entscheidungen geöffnet bzw. geschlossen werden. Diese Entscheidungen abzuwägen und zu treffen, heißt zum einen, mit Ungewissheiten und Unsicherheiten umgehen zu müssen, zum anderen verdeutlicht es aber die Bedeutung von vereinbarten und möglichst von den relevante Akteuren geteilten Vorstellungen über die einzuschlagenden Pfade.
- In der Entwicklung der vier Fallstudien war stets darauf geachtet worden, einerseits Ressourcenleichtigkeit anzustreben, andererseits jedoch die modellierten Veränderungen im Rahmen des technisch und gesellschaftlich Machbaren bzw. Akzeptierten anzulegen. Es wurde demnach nicht pauschal für alle Infrastruktursektoren von erheblichen gesellschaftlichen und soziotechnischen Veränderungen im Sinne einer radikalen Transformation der Systeme ausgegangen. Zum Beispiel mit Blick auf die Siedlungswasserwirtschaft wurde eine weitreichende Transformation der existierenden Systeme zu einem konsequenten Wasserspar- und Stoffstromtrennsystem (praktisch umsetzbar z. B. über Urinseparationstrockentoiletten und dezentrale Wasserkreislaufführungen von Grau- und Schwarzwasser sowie Betriebswasser) nicht in den Fallstudien abgebildet. Dies schlägt sich insbesondere in den Ergebnissen der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ nieder, in der die orientierende Stoffstromanalyse nur geringe Wirkungen im Hinblick auf Ressourcenleichtigkeit in Bau und

Betrieb ausweist. Maßnahmen im Kontext eines (dezentralen) Niederschlagswassermanagements, die im Zuge der Anpassung an den Klimawandel nicht nur auf den Ausbau der technischen Infrastrukturen wie Regenrückhaltebecken im Kanalnetz setzen, sondern mit eher ressourcenleichten Optionen der Retention etwa in Form von Gründächern oder zur Versickerung operieren, wurden in einer Szenarette (vgl. Kapitel 3.3.1) auf ihre Ressourcenleichtigkeit hin geprüft. Jedoch zeitigen sich auch hier nur marginale Änderungen.

- Im Rahmen des Vorhabens wurden auch keine radikalen Veränderungen des Bedarfs an Infrastrukturdienstleistungen (z. B. Suffizienz) modelliert, die sich in grundlegende Transformationen der Infrastrukturen bzw. Bedarf an Infrastrukturausstattung niederschlagen würden. In der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ wurden technische und soziale Innovationen implementiert, die eine Verkehrsverlagerung- und Vermeidung und eine bessere Auslastung der Verkehrsinfrastrukturen ermöglichen. Die Verkehrsvermeidung im Personenverkehr ist jedoch nicht als radikale Veränderung des Bedarfes zu sehen, da die Mobilität weiterhin gewährleistet wird, es werden jedoch kürzere Wege zurückgelegt und Fahrzeuge besser ausgelastet. Aufgrund der geringeren Straßenverkehrsleistung kann in der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ ein geringerer Zubau an Infrastruktur abgebildet werden. Auf der anderen Seite bedarf es für das in der Fallstudie beinhaltete Wachstum im Schienenverkehr dort neben Maßnahmen zur Kapazitätserhöhung eines weiteren Netzausbaus. Die Ergebnisse dieser Fallstudie verdeutlichen, dass die Instandsetzung und Erneuerung des bereits existierenden Infrastrukturbestands einen größeren Einfluss auf die betrachteten Wirkungskategorien besitzt als die Infrastrukturerweiterung. Obwohl in der Fallstudie auf einen Netzausbau nach dem Jahr 2030 verzichtet wird und größere Flächen umgewidmet werden (ehemalige Stellflächen), verringern sich die Ergebnisse aller betrachteten Wirkungskategorien lediglich im einstelligen Prozentbereich. Bei der Prüfung der Umsetzung neuer Infrastrukturprojekte sollte deshalb die zukünftig induzierte Ressourceninanspruchnahme für Instandhaltung und Ersatzneubauten mit in der Bewertung berücksichtigt werden.
- Die Frage nach den geeigneten Maßnahmen zur ressourcenleichten Gestaltung der Infrastrukturen und welche (langfristigen) Strategien verfolgt werden können und den Entscheidungen zugrunde liegen, ist nicht einfach. Schon die Diskussion und Verständigung im Rahmen der interdisziplinären Bearbeitung des Vorhabens haben unterschiedliche Sichtweisen und Bewertungen gezeigt.
- Die Gewichtung der Zieldimensionen und damit etwa die Priorisierung von Ressourcenleichtigkeit z. B. gegenüber Resilienz oder Akzeptanz im Hinblick auf eine konkrete Infrastrukturentscheidung kann nicht abstrakt oder pauschal getroffen werden. Sie kann in der Praxis nur im politischen und Stakeholder-Dialog erfolgen. Grundlage sollte eine integrierte und partizipative Abschätzung und Bewertung der möglichen Wirkungen im Hinblick auf Gestaltungsmerkmale von Infrastruktursystemen sein, die wiederum in die Planung und Umsetzung von Infrastrukturen zurückwirken sollten.
- Auch die Diskussion und Einschätzung der Fallstudien anhand der qualitativen Kriterien zeigen, dass pauschale, verallgemeinerbare Aussagen nur bedingt möglich sind. Im Prinzip können die Kriterien nur im jeweiligen konkreten räumlichen, ökologischen und sozioökonomischen Kontext beurteilt werden. Ferner zeigte sich in den Diskussionen zu den Kriterien, dass diese nur auf einzelne, infrastruktursystemspezifische Maßnahmen angelegt und mögliche Wirkungen eingeschätzt werden können:
    - Für eine Einschätzung der Resilienz einer Fallstudie ist zum ersten das Ereignis, das auf die Infrastruktur im Rahmen der Fallstudie einwirkt (z. B. Klimaereignis, Unfall, Sabotage etc.), zu differenzieren und zu bestimmen. Sodann sind zum zweiten die verschiedenen Infrastrukturkomponenten und -kopplungen bzw. die technische Konfiguration der Systeme

und ihre Governance zu modellieren. Vor diesem Hintergrund können die Aussagen zur Resilienz nur eine kleine Auswahl möglicher Fälle/Szenarien und Argumente anreißen.

- Ein Ergebnis der Auseinandersetzung mit der in den Fallstudien angelegten Flexibilität, um z. B. an sich verändernde Rahmenbedingungen angepasst zu werden, ist, dass Flexibilität nicht nur auf die technischen Komponenten bezogen werden sollte. Die Möglichkeit, in den Fallstudien im Rahmen der technischen Systeme Stoffströme oder Kapazitäten anzupassen oder Energieträger zu wechseln, ist sicherlich zentral. Ebenso wichtig ist Flexibilität aber auch im organisatorischen Prozess (Steuerung und Entscheidungen). Die Diskussion mit Blick auf die Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ brachte als ein Argument die „mentale“ und im Alltag eingeübte Flexibilität der Nutzer in multimodalen Verkehren hervor.
- Alle Fallstudien weisen Potenziale für Teilhabe der Bürgerinnen und Bürger an Fragen der Infrastrukturgestaltung und auch der Erbringung von Dienstleistungen auf. Dabei reicht Beteiligung von politischer Partizipation bis zu neuen Formen und Rollen der Bürger in der Leistungserstellung. Durch dezentrale Energieerzeugung (eigene PV-Anlagen auf dem Hausdach, Mieterstrom oder Bürgerenergiegenossenschaften) oder Dienstleistungen im Verkehrsbereich (Bürgerbusse, Ridesharing etc.,) schlüpfen ehemalige „Konsumenten“ und Kunden in Rollen von „Prosumern“ und Produzenten.
- Die Einschätzung der Fallstudien hinsichtlich ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz zeigt, dass diese grundsätzlich gegeben ist. Die Fallstudien bewegen sich auch nicht in radikalen Transformationen, sondern modellieren eher moderate Umgestaltungsoptionen. Gleichwohl ist auch die Akzeptanz abhängig von der konkreten Einzelmaßnahme. Insbesondere dürfte die Akzeptanz einer Infrastrukturmaßnahme von Lebensstilen und Einstellungen der Bürgerinnen und Bürger bzw. Nutzer und von deren persönlicher Betroffenheit abhängen. Ferner spielen Art und Qualität der (öffentlichen, politischen) Kommunikation und Einbindung der Menschen in den Planungs- und Umsetzungsprozess eine Rolle – sofern es sich um eine Aufgabe der Infrastrukturplanung (z. B. Bau von Windkraftanlagen, Verkehrswegen) handelt. Anders verhält es sich bei Optionen, die eher marktbasiert realisiert werden. Diese werden bei fehlender Akzeptanz bzw. Nachfrage eingestellt (z. B. Dienstleistungsangebote im Verkehr oder „smarte“ Energielösungen).

- Wie bereits festgestellt, sind die Spielräume zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme durch eine einfache bauliche Umgestaltung der Infrastruktursysteme in den gewählten Fallkonstellationen begrenzt, wenn sich die Modellierung auf Bau, Instandhaltung, Reparatur und Betrieb von Infrastruktursystemen beschränkt und nicht an die Nutzung sowie an Bedarfen bzw. der Nachfrage nach Infrastrukturdienstleistungen angesetzt wird. Denn der Energieaufwand im Betrieb und bei der Nutzung der Infrastrukturen stellt einen großen Faktor dar, so dass die Betrachtung bzw. Suche nach ressourcenleichten Infrastrukturen nicht nur die Aufwendungen für den Betrieb, sondern auch für die Nutzung einbeziehen sollte.
- Für eine ressourcenleichte Gestaltung der Infrastruktur müssen verschiedene Maßnahmen („Bausteine“) miteinander kombiniert werden (wie Szenarette 2 verdeutlicht), was integrierter und sektorenübergreifender Lösungsansätze bedarf. Die Szenaretten (3 und 4) zeigen, dass es weitere Optionen gibt, die eine über die Fallstudien hinausgehende Reduktion der Ressourceninanspruchnahme ermöglichen. Dies verdeutlicht, dass die Fallstudien keine für sich abgeschlossen Szenarien darstellen, sondern lediglich jeweils ein für sich abgeschlossenes Themenfeld adressieren. Die einzelnen umgesetzten Maßnahmen sind als „Bausteine“ zu verstehen, die kombiniert werden können, wodurch sich für die betrachten Wirkungsindikatoren KRA, KEA, THG und versiegelte Fläche stärkere Potenziale in Hinblick auf eine ressourcenleichte Gestal-

tung ergeben. An diesem Beispiel wird deutlich, wie wichtig eine integrierte und sektorenübergreifende Betrachtung der Gestaltungsoptionen ressourcenleichter Infrastrukturen ist.

4. Methodische Hinweise und Erkenntnisse aus der Bearbeitung:

- Ein zentraler Aspekt, der bei der Interpretation der Ergebnisse der Modellierung zu beachten ist und hier noch einmal in Erinnerung gerufen werden soll, liegt in der im Vorhaben angelegten hohen Aggregation. Im Vorhaben RELIS wurde keine umfassende Ökobilanz, sondern eine orientierende Stoffstromanalyse durchgeführt. Aufgrund der Größe und Komplexität des Betrachtungsgegenstandes war eine detailliertere Bilanzierung nicht vorgesehen. Die Stoffstromanalyse soll einen Vergleich verschiedener Umgestaltungsvarianten/Konstellationen im Vergleich zum Referenzszenario ermöglichen. Die im Vorhaben erarbeitete orientierende Stoffstromanalyse bezieht sich auf den Infrastrukturbestand in Deutschland und nimmt keine räumliche und siedlungsstrukturelle Differenzierung vor. Welche konkrete Infrastrukturgestaltung an einem konkreten Ort sinnvoll und realisierbar ist, hängt von Rahmenbedingungen vom jeweiligen Ort ab. Diese Aspekte können sich lokal als relevant und wirkmächtig erweisen.
- In den Szenarien/Fallstudien wurde mit einer Ausnahme (Strom für Bauaufwendungen und Betrieb der Infrastruktur) bis zum Jahr 2050 mit statischen Wirkungsfaktoren gerechnet. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass sich die mit der Gewinnung der Rohstoffe verbundenen Umweltauswirkungen und Energieverbräuche in Zukunft verändern. Ursachen für solche Veränderungen können z. B. die Änderung des Strommixes in den Förderländern, eine Verschiebung hin zu anderen Förderländern oder die zukünftige Nutzung von Rohstofflagerstädten, die nur mit hohem Aufwand erschlossen werden können, sein.
- Bei der Darstellung der Gesamtergebnisse ist zu beachten, dass keine Trugschlüsse auf Basis der quantitativen Ressourcenparameter (insb. KRA) gezogen werden dürfen. Beispielsweise nimmt IKT zwar einen sehr geringen Anteil bei den Rohstoffen ein (KRA-Werte) und es liegt zudem eine schlechte Datenlage vor, aber es gibt im IKT-Sektor sehr hohe Wachstumsraten, viele kritische und seltene Rohstoffe (z. B. seltene Erden), die verwendet werden, und nicht absehbare technologische Entwicklungen mit möglicherweise hohem Rohstoffaufwand. Eine isolierte Sektorenbetrachtung insb. mit Blick auf die qualitativen Merkmale (Knappheiten, Kritikalität etc.) der im IKT-Sektor eingesetzten Rohstoffe bietet sich daher an, um die Relevanz der IKT-Infrastrukturen nicht zu unterschätzen. Ferner liefern die IKT-Infrastrukturen die technologische Basis für neue und vertiefende Kopplungen der anderen Infrastruktursysteme und deren „intelligenter“ Steuerung.
- Der Parameter KRA sagt nichts über die Knappheit oder Umweltrelevanz von Rohstoffen aus. Eine kritische Betrachtung gilt es daher insbesondere mit Blick auf den IKT- und Energie-Sektor (z. B. PV-Module, Batteriespeicher) und potenzielle Konflikte um (seltene) Rohstoffe zu führen. Zwar können mögliche Ressourcen- und Knappheitskonflikte im Vorhaben nicht betrachtet werden, da dies den Aufwand einer eigenen Studie nach sich ziehen würde, doch ist dies ein wesentlicher Punkt, der später weitere Maßnahmen beeinflussen kann. Letztendlich müssten bestimmte Rohstoffe aus dem KRA näher betrachtet werden, um gegebenenfalls alternative Ausbauszenarien zu konstruieren bzw. ein Recycling kritischer Stoffe gezielt zu fördern. Relevante Fragestellungen wären u.a., welchen Einfluss seltene Erden auf die Nutzung von erneuerbaren Energien haben oder die konkurrierende Nutzung von Kobalt im IKT-Sektor und bei den erneuerbaren Energien. Diese Fragen konnten im Rahmen von RELIS jedoch nicht bearbeitet werden.

# Teil D: Best-Practice-Beispiele

## 1 Einführung

In diesem Abschnitt D werden für diese Studie relevante „Best-Practice-Beispiele (BPB)“ betrachtet, d. h. konkrete, bereits umgesetzte Maßnahmen und Strategien, die im Fluchtpunkt einer ressourcenleichten, zukunftsorientierten Gestaltung der Infrastruktursysteme stehen. Diese BPB wurden nicht direkt aus den im obigen Kapitel C aufgeführten Fallbeispielen abgeleitet und sind deshalb von diesen getrennt zu betrachten, da die BPB einen deutlichen Bezug zu bereits umgesetzten ressourceneffizienten Infrastrukturmaßnahmen besitzen. Jedoch liegt es in der Natur der Untersuchung, dass sich die ausgewählten BPB den obigen Fallstudien generell zuordnen lassen.

Die Auswahl der BPB wurde entlang der Kriterien Potenziale für Ressourcenleichtigkeit, Umsetzbarkeit, Übertragbarkeit und Bezahlbarkeit getroffen. Zudem fanden die unterschiedlichen Ausprägungen des demografischen Kontextes (wachsend, schrumpfend, stabil) und räumliche bzw. siedlungsstrukturelle Gegebenheiten (städtisch, ländlich) sowie verschiedene mögliche Akteursmodelle Berücksichtigung.

Die BPB wurden aus einem Pool von ursprünglich über 60 Beispielen ausgewählt, der auf 20 Fälle verdichtet wurde. Die Beispiele bilden ab, „was möglich ist“. Gleichsam kann man von diesen Beispielen „lernen“. Es wurde versucht, ein möglichst großes Spektrum an technischen und institutionellen Lösungen auszuwählen sowie eine breite Streuung hinsichtlich der Umsetzungskontexte zu gewährleisten. Die spezifischen Merkmale und Erfolgsfaktoren eines jeden BPB wurden diskursiv herausgearbeitet. Abschließend wurden aus den hier versammelten BPB Anregungen für mögliche Handlungsempfehlungen abgeleitet, die sowohl konkrete Umsetzungsschritte als auch politische Rahmenbedingungen adressieren. Diese Anregungen wurden direkt in die entwickelten Handlungsempfehlungen des Kapitels E eingepflegt und werden in diesem Teil nicht einzeln aufgeführt, um Redundanzen zu vermeiden.

### 1.1 Herausforderungen im Kontext der BPB

Die technischen Infrastrukturen stehen vor allgemeinen wie auch sektorspezifischen Herausforderungen, die kurz- und langfristig von den Akteuren in Bund, Ländern, Kommunen und von privaten Dienstleistern angegangen werden müssen. Bei der Auswahl der BPB wurden die allgemeinen Herausforderungen[97] und Probleme der technischen Infrastruktur berücksichtigt. Diese sind:

- der demografische Wandel,
- Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel,
- siedlungsstruktureller Wandel und zunehmende räumliche Disparitäten zwischen prosperierenden und strukturschwachen Regionen,
- Sicherung/Finanzierung der Daseinsvorsorge im ländlichen Raum,
- reduzierte bzw. sich weiter einengende finanzielle Handlungsspielräume der öffentlichen Hand (insbesondere der Kommunen im Zuge der Schuldenbremse),
- hohe Investitionsbedarfe und Infrastrukturfolgekosten,
- Resilienz von technischen Infrastrukturen (robust gegenüber äußeren Auswirkungen, Witterungsbedingungen und/oder Überlastung oder Unterauslastung).

Die oben aufgeführten Herausforderungen sind „global“ und somit auf alle technischen Infrastrukturen zu übertragen. Jedoch sind weitere virulente Probleme zu nennen, die den einzelnen Sektoren

97 Vgl. hierzu und z. T. vertiefend Teil B, Kapitel 1 „Allgemeine, Infrastruktursektoren übergreifende Veränderungsprozesse der Rahmenbedingungen und Zukunftstrends“.

„Energie“, „Wasser und Abwasser“, „Verkehr“ und „IKT“ konkret zuzuordnen sind. Deshalb wurden ergänzend und vertiefend die nachfolgenden Herausforderungen identifiziert, die bei der Auswahl der BPB – soweit möglich – berücksichtigt wurden.

**Energieinfrastruktur**

- Suche nach Chancen und (neuen) Geschäftsfeldern für Stadtwerke im Rahmen der Energiewende,
- veränderte Kostenstrukturen der Erzeugung; kommunale Versorgungsunternehmen sind z. T. ökonomisch in Bedrängnis geraten – Folgen für den Kommunalhaushalt,
- Umstieg auf erneuerbare Energien (inkl. Speicherung),
- Realisierung lokaler Klimaschutzziele,
- Gestaltung der „Wärmewende“ vor Ort,
- Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich (auch in kommunalen Liegenschaften),
- Entwicklung der Verteilnetze (u.a. Smart Grids),
- neue Eigentümerstrukturen: Re-Kommunalisierungen des Infrastrukturbetriebs, Gründung von Bürgerenergiegenossenschaften.

**Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur**

- sinkende Wasserentnahmen und -verbrauch in schrumpfenden Regionen?,
- Rückgang der Einwohner pro km Netzlänge durch demografischen Wandel (Einwohnerrückgang) und siedlungsstrukturelle Trends, „Entdichtung“ von Infrastrukturnetzen und Rückgang ihrer Auslastung (Funktionsschwellen, Kosten),
- Ressourceneffizienz, insbesondere die Steigerung der Energieeffizienz von Kläranlagen,
- Rückgewinnung von Phosphor,
- Nitratbelastung der Rohwasservorkommen,
- anthropogene Mikroverunreinigungen z. B. durch Human- und Veterinärarzneimittel, Pflanzenschutzmittel, Biozide, Industriechemikalien und Produkte des täglichen Bedarfs.

**Verkehr**

- Reduzierung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen (u.a. $CO_2$, Feinstaub und Ozon),
- Flächeninanspruchnahme durch Verkehrsinfrastrukturen,
- in wachsenden Regionen kann eine Zunahme des Verkehrsaufkommens zu Engpässen führen,
- in Regionen mit abnehmenden Bevölkerungszahlen kann die Auslastung von Infrastruktur und öffentlichen Verkehrsmitteln zurückgehen,
- Rückgang des Schülerverkehrs als Rückgrat ländlicher Verkehrsunternehmen führt zu einer Gefährdung des ÖPNV in diesen Gebieten,
- Schutz vor Lärm,
- Beschaffenheit und Mängel der Verkehrsinfrastruktur,
- rückläufige Infrastrukturfinanzierung durch den Bund im Verkehrssektor.

**Informations- und Kommunikationstechnologien**

- Einbindung der Digitalisierung in der Stadt und in ländlichen Räumen,
- Digitalisierung der Kommunalverwaltung: Big Data, Open Data, Datenschutz, Datensicherheit.

Die geschilderten Herausforderungen und Problemlagen spannen die Hintergrundfolie für die Identifikation und Auswahl der BPB im Vorhaben RELIS auf. Nachfolgend wird auf die Auswahl der 20 Best-Practice-Beispiele eingegangen.

## 1.2 Vorgehen zur Identifizierung von 20 BPB

Für RELIS relevante Best-Practice-Beispiele wurden mittels einer Internet- und Literaturrecherche identifiziert. Zudem wurden die Ergebnisse aus den ersten Projektarbeitspaketen sowie andere Projekte genutzt z. B. Nationale Plattform Zukunftsstadt, netWORKS, SPECIAL, RegioRess. Ergänzend wurden interne Expertenbefragungen im UBA, Difu und Öko-Institut durchgeführt.

Bei der Recherche wurden vom Auftragnehmer über 68 BPB identifiziert, die in einem Pool zusammengeführt wurden. Zu jedem Best-Practice-Beispiel wurde ein Template angelegt, in dem relevante Informationen, wie etwa zum technischen Ansatz, der zentralen Innovation, den Governance-Strukturen und ihren Akteuren, Motivationen und Anreizen, die jeweiligen Raumstrukturen und Quellen zusammengeführt sind (ca. zwei Seiten). Auf Grundlage einer ersten kriterienbasierten Einschätzung (z. B. Problemstellung, Innovation, zentral/dezentral, Ressourcenleichtigkeit, Demografiefestigkeit, Kosten, Übertragbarkeit) wurden aus diesen mehr als 68 gesammelten BPB dann 32 Projekte für eine weitere Untersuchung ausgesucht. Die gewählten 32 BPB wurden eingehend beschrieben und qualitativ bewertet. Im Mai 2016 wurden die 32 BPB auf einem Workshop mit dem UBA präsentiert und diskutiert. Der Workshop diente dazu, aus 32 Vorschlägen abschließend 20 BPB zu identifizieren, die hinsichtlich des Projektes RELIS eine besondere Relevanz entfalten. Hierzu wurde eine Priorisierung der BPB mit anschließender Diskussion zur Auswahl der 20 „besten“ BPB durchgeführt. Für die ausgewählten 20 BPB wurden die ausgearbeiteten Templates überarbeitet und weiter konkretisiert. Zu beachten ist, dass einige sehr gute BPB aufgrund von Redundanzen nicht weiter betrachtet wurden.

Die 20 ausgewählten BPB wurden den für das Projekt relevanten Clustern „Energie“ (5 BPB), „Wasser“ (4 BPB), „Mobilität“ (7 BPB) und „Integrierte Planung/Ressourcen“ (4 BPB) zugeordnet. Die Identifikation von sektorspezifischen Aussagen und Handlungsempfehlungen (siehe Teil E) wird somit erleichtert. Zudem ermöglicht die Darstellung der 20 Best-Practice-Beispiele in den vier Clustern eine bessere Orientierung im Text. Zu beachten ist, dass ein großer Teil der ausgewählten Bespiele integrierte Ansätze verfolgt und somit eine Zuordnung zu einem anderen Cluster möglich wäre. In Tabelle 21 sind die 20 ausgewählten Best-Practice-Beispiele (BPB) aufgelistet.

Tabelle 21: Übersicht der 20 Best-Practice-Beispiele

| NR. | BPB |
|---|---|
| **Cluster Energie** | |
| 1 | Power-2-Heat-Anlage der Technischen Werke Ludwigshafen |
| 2 | Smart Grids Modellregion Salzburg |
| 3 | Virtuelles Kraftwerk der ABG Frankfurt Holding und der Mainova AG |
| 4 | Hybrides-Kraftwerk Prenzlau – Wasserstoff-Wind-Biogas |
| 5 | Regionales Regelkraftwerk Feldheim (RRKW) |
| **Cluster Wasser** | |
| 6 | Abwärme aus Abwasser am Beispiel von IKEA in Berlin |
| 7 | Fernkälte aus Grundwasserüberleitung für Rechenzentrum in München |
| 8 | Fernkälte aus Grundwasserüberleitung für Rechenzentrum in München |
| 9 | Kleinkläranlagen entlasten kommunale Haushalte – Beispiel „Dahler Feld“ |
| **Cluster Mobilität** | |
| 10 | Optimierung der Warenlieferungslogistik mit dem Cargohopper |
| 11 | Nachhaltige Mobilität durch Umsetzung des Fahrradkonzepts Kopenhagen |
| 12 | Mobilcard Krenglbach (inkl .eCarsharing) |
| 13 | Interurbanes Verkehrsmanagement Stockholm |
| 14 | Intermodalitätskarte Stuttgart |
| 15 | Elektro-Bürgerrufauto in Oberreichenbach |
| 16 | StreetScooter in Bonn – $CO_2$-freie Zustellung durch DP/DHL |
| **Cluster Integrierte Planung/Ressourcen** | |
| 17 | Umsetzung des eco-cycle-models am Beispiel Hammarby-Sjöstad in Stockholm |
| 18 | Nutzung von Biogas zum Antrieb von Müllfahrzeugen der Berliner Stadtreinigung |
| 19 | Einsatz von Recycling-Beton durch die Ressourcenstrategie Zürich |
| 20 | Maximalrecycling 90 in Baden-Württemberg |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Bei den aufgeführten BPB wurden keine detaillierten Fallstudien mit Interviews und ergänzenden Berechnungen durchgeführt. Es wurde vor allem auf Literatur und Informationen aus dem Internet zurückgegriffen, weshalb sensible bzw. nicht öffentliche Informationen in den folgenden Darstellungen nicht eingeflossen sind.

Im nachfolgenden Kapitel werden die 20 ausgewählten BPB umfassend dargestellt.

# 2 Darstellung der ausgewählten Best-Practice-Beispiele (BPB)

Die ausgewählten 20 BPB werden jeweils einer festgelegten Struktur entsprechend dargestellt. Grob einteilen lässt sich die Darstellung der BPB in Einleitung, Beschreibung (a) und Bewertung (b). Im Detail werden folgende Aspekte der BPB dargestellt:

(1) Vorangestellt ist jedem Beispiel ein kurzer Überblick, in dem der Fall als solches, der Umsetzungsort, die zentralen Akteure, wie auch die adressierten infrastrukturellen Teilsysteme benannt werden. Diesem Überblick schließt sich eine ausführliche Beschreibung des Beispiels an. (2) Zunächst werden die Probleme und Herausforderungen beschrieben, die von dem jeweiligen Beispiel adressiert werden. Sie adressieren einen effizienteren Einsatz von Ressourcen (Materialien, Energie und Fläche). Dies ist strukturell in der Ausrichtung der Auswahl begründet, wenngleich die Abbildung eines breiten Spektrums gewahrt wird. (3) Im Anschluss hieran wird der technische Ansatz des Beispiels erläutert. Hier werden, soweit bekannt, auch zentrale Kennwerte etwa zur Leistungsfähigkeit der entsprechenden Anlagen angegeben. (4) Mitunter werden gemeinsame Interessenslagen und Motive der Akteure beleuchtet. Zudem wird hier auf etwaige Anreizmechanismen eingegangen, die zur Umsetzung eines Projektes beigetragen haben. (5) Hier schließt dann sinn-logisch die Dokumentation der Investitionskosten und soweit möglich der Betriebskosten sowie ggf. Angaben zur Zahlung von Fördermitteln an. (6) Zur besseren Einordnung des Beispiels wird hierauf folgend der demografische wie der siedlungsstrukturelle Kontext, in dem das Beispiel umgesetzt wurde, erläutert. Mit Demografie und Siedlungsstruktur werden zwei Variablen eingeführt, die zur Einschätzung hinsichtlich einer potenziellen Übertragbarkeit unablässig sind. (7) Unter der Überschrift ‚Innovationsgehalt' wird das Beispiel dann erstmalig andiskutiert, um herauszustellen, inwiefern das Beispiel Neuartiges in den Diskurs einführt bzw. in welcher Hinsicht es von besonderem Interesse ist, gerade dieses Beispiel zu dokumentieren und kennenzulernen. (8) Abschließend wird die Governance-Struktur kurz beschrieben, sprich die verantwortlichen Akteure identifiziert und sodann die, soweit schon vorhanden, erzielten Erfolge (9) skizziert.

Diesem rein deskriptiven Teil folgt eine Bewertung des Beispiels (10). In Absprache mit dem UBA wurden die nachstehenden Kriterien hierfür entwickelt, anhand derer jedes Beispiel diskutiert wird (Tabelle 22). Die Kriterien bilden in gewisser Weise Erfolgsparameter ab und sind wie folgt präzisiert.

Tabelle 22: Kriterien zur Beschreibung der BPB

| Kriterium | Beschreibung |
|---|---|
| Ressourcenleichtigkeit | Beitrag des BPB zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme: Rohstoffe, Energie, Fläche |
| Demografiefestigkeit | Beitrag des BPB zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme: Rohstoffe, Energie, Fläche |
| Übertragbarkeit (Raum) | Beschreibung der Übertragbarkeit des BPB auf geeignete Raum- und Siedlungstypen |
| Problembewältigungspotenzial | Darstellung welche Probleme und Herausforderungen mit dem BPB begegnet werden können |
| Innovationsgehalt | Beitrag des BPB zur Innovation – wie ist das technisch, soziale, institutionelle Veränderungspotenzial? |
| Zentral/Dezentral | Organisation des BPB in zentraler oder dezentraler Infrastruktur |
| Übertragbarkeit (Akzeptanz) | Soziale Akzeptanz der Bürger in Bezug auf das BPB |
| Ökonomische Tragfähigkeit | Darstellung in wie weit ein solches System sich selbst ökonomisch tragen kann und ob es kosteneffizient ist. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Die strukturierte Auseinandersetzung mit einem BPB anhand dieser Kriterien informiert über die verschiedenen Aspekte des Beispiels und beschreibt somit gleichsam die Erfolgsparameter des Projektes. Auch werden mögliche Synergieeffekte zu anderen Infrastruktursektoren stets mitgedacht.

Auf diese Weise wird im Rahmen der Diskussion schlussendlich das Potenzial für eine weitreichende Umsetzung der in den einzelnen BPB eingesetzten Technologien und Ansätzen abschätzbar.

## 2.1 BPB im Cluster Energie

### 2.1.1 Power-to-Heat-Anlage der Technischen Werke Ludwigshafen

Mit der Power-to-Heat-Anlage (PtH) werden die Teilsysteme Strom und Wärme (Fernwärmenetz) adressiert. Die Technischen Werke Ludwigshafen (TWL) haben das städtische Fernheizkraftwerk Ludwigshafen um eine Power-to-Heat-Anlage ergänzt. Die Anlage besitzt sieben Prozesserhitzer, die elektrische Energie in Wärme umwandeln. Dadurch lassen sich schwankende Strommengen aus erneuerbaren Quellen besser nutzen und die Stromnetze stabilisieren. Die vorhandene Infrastruktur mit Fernheizwerk, Wärmespeichern und Wärmenetzen bietet sehr gute Voraussetzungen für den Einsatz von Elektroerhitzern. Damit beteiligen sich die TWL im Rahmen der Wachstumsstrategie TWL 2020 aktiv an Lösungen zur Umsetzung der Energiewende. Dazu zählt die Aufgabe, das Energieangebot und die Stromnetze zu stabilisieren.

#### a. Beschreibung der PtH- Anlage in Ludwigshafen

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Um eine klimafreundliche Energieversorgung in Deutschland sicherzustellen, müssen Anlagen zur Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien installiert werden, deren Kapazitäten deutlich über dem Regelverbrauch liegen müssen. Dies führt dazu, dass bei spezifischen Wetterlagen deutlich mehr Strom produziert wird als benötigt. Die Stromerzeugung unterliegt, mitunter wetterbedingt, hohen Schwankungen (Volatilität). Des Weiteren wurden Überkapazitäten bislang nicht umfassend genutzt, bzw. vorhandene Infrastrukturen werden temporär abgeregelt. Der Strommarkt wird zudem dezentraler und kleinteiliger. Die Herausforderung besteht darin, die volatile Stromerzeugung und die Verbräuche auszugleichen, damit die Stromversorgung stabil betrieben werden kann. Flexibilitätsoptionen zum Umgang mit der volatilen Erzeugung von EE-Strom sind z. B. Lastmanagement und Speicher. Ein erhöhter digitaler Steuerungs- und Informationsverarbeitungs-bedarf ist die Folge. Intelligente Steuerungssysteme sowie eine passende Infrastruktur sind hierfür notwendig (z. B. Sektorenkopplung KWK/Nahwärme).[98] Mit der Power-to-Heat Technologie wird Überschussstrom in Wärmenergie umgewandelt und gespeichert. Dies kann zu einem optimierten Lastmanagement im Strombereich sowie zur Reduzierung von THG-Emissionen und Luftschadstoffen durch geringere Verbräuche fossiler Energieträger beitragen.

**Technischer Ansatz**

Um das Abregeln von Erzeugungsanlagen zu reduzieren, muss das temporäre Überangebot an Strom im Netz abgeführt und sinnvoll genutzt werden. Dazu kann TWL mit der Power-to-Heat-Anlage einen Beitrag leisten, weil sie Überschussstrom in Wärme umwandelt. Einerseits wird über einen Wärmespeicher Regel-leistung zur Verfügung gestellt und anderseits kann Wärme direkt ins Fernwärmenetz

98 In Dänemark werden bereits über 40 Prozent des Stroms aus Wind erzeugt, weshalb bereits um 2005 erste Power-to-Heat-Anlagen errichtet wurden. Siehe Euractiv: https://www.euractiv.de/section/energie-und-umwelt/news/windkraft-danemark-knackt-eigenen-weltrekord/ (22.04.2016), siehe Agora-Energiewende: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/power-to-heat/Agora_PtH_Langfassung_WEB.pdf (22.04.2016).

eingespeist werden. Wenn die Strommenge im Netz zu groß ist, geht die Power-to-Heat-Anlage in Betrieb und speist die entstehende Wärme in das Ludwigshafener Fernwärmenetz ein oder speichert diese Energie zwischen. Besonderheit der Power-to-Heat-Anlage ist ihre kurze Reaktionszeit: In weniger als fünf Minuten ist die verlangte Leistung erreicht. Durch die kurze Reaktionszeit kann TWL hochwertige, sekundäre Regelleistung anbieten.

Die Power-to-Heat-Anlage der TWL besteht aus zwei Prozesserhitzern mit je 5.000 kW/690 V, in denen strombetriebene Heizröhren Wasser erhitzen (ähnlich dem Prinzip des Durchlauferhitzers in Haushalten). Die Prozesserhitzer leisten zusammen 10 Megawatt und können stufenlos geregelt werden. Die beiden Erhitzer sind strömungstechnisch parallel geschaltet und direkt in das Fernwärmenetz eingebunden. Sie können jeweils auch einzeln betrieben werden. Die Wassereintrittstemperatur beträgt ca. 70°C und wird am Austritt bei einem maximalen Volumenstrom von 260 $m^3$/h auf max. 130°C hochgeheizt. Die Energieversorgung erfolgt aus der Mittelspannungsebene über ein Doppelsammelschienensystem an zwei Mittelspannungstransformatoren mit jeweils 6.000 kVA; 21 kV/690 V. Diese speisen über Stromschienen in die Erhitzer-Schaltanlagen ein.

Die mittlere Leistungsabgabe in das Fernwärmenetz liegt bei ungefähr 60 Megawatt, in der Spitze werden bis zu 100 Megawatt benötigt. Ein 1200 Kubikmeter fassender Wärmespeichertank soll die sinnvolle Verwendung der von den zwei Durchlauferhitzern mit jeweils 5 MW Leistung erzeugten Wärme jederzeit gewährleisten.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Vom Land Rheinland-Pfalz wurde das Forschungsprojekt zum Thema „virtuelle Kraftwerke“ gefördert. Bearbeitet wurde es von der Transferstelle für regenerative und rationelle Energienutzung der FH Bingen. Das Vorhaben soll einen Beitrag zum regionalen Lastmanagement leisten, wobei die TWL von möglichen Ein-nahmen im Markt für sekundäre Regelleistung profitieren kann.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

TWL investierte etwa 1,5 Millionen Euro in die Power-to-Heat-Anlage sowie 1,2 Millionen Euro in den Wärmespeicher.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)**

Die Stadt Ludwigshafen ist urban geprägt und eines von fünf Oberzentren des Landes Rheinland-Pfalz. Die Stadt wächst nach Angaben der Bertelsmann-Stiftung um 4,9 % bis 2030.

**Innovationsgehalt/-kern**

Bessere Integration von erneuerbaren Energien in einen volatilen Strommarkt. Mit diesem System steht Regelleistung schnell zur Verfügung und Wärme wird in das Ludwigshafener Fernwärmenetz eingebunden. In weniger als fünf Minuten ist die verlangte Leistung erreicht. Durch die kurze Reaktionszeit können die TWL erstmals hochwertige, sekundäre Regelleistung anbieten. Dadurch lassen sich schwankende Strommengen aus erneuerbaren Quellen besser nutzen und die Stromnetze stabilisieren. Das Beispiel zeigt, wie die Trans-formation des Energiesystems im Bereich der dezentralen Energieversorgung durch lokales Know-how erfolgreich umgesetzt werden kann.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Technische Werke Ludwigshafen (TWL) stellen die Infrastruktur und Clean Energy Sourcing (Clens) über-nimmt die Steuerung (IKT) als Vermarkter von Regelenergie.

- Initiator: Land Rheinland-Pfalz (durch Forschungsprojekt)

- Zielgruppen/Adressat: Kommunen des Bundeslandes, Ludwigshafen – Technischen Werke Ludwigshafen (TWL)

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Die Power-to-Heat-Anlage ist seit 2015 am Markt tätig.

### b. Bewertung PtH-Anlage in Ludwigshafen

**Ressourcenleichtigkeit**

Das Beispiel zeigt, dass vorhandene Infrastruktur zur Speicherung und Bereitstellung von Überschussenergie genutzt werden kann. Ressourcen werden eingespart, indem Überschussenergie (Strom) in Wärme umgewandelt wird. Auf diese Weise werden zum einen fossile Primärenergieträger eingespart – hier Gas –, zum anderen werden Erzeugungsanlagen besser ausgelastet und müssen nicht abgeregelt werden, was insgesamt den Betrieb der Anlagen und gleichsam den Einsatz von Ressourcen effizienter gestaltet. Schwankungen im Stromnetz können besser ausgeglichen werden, da die Energie je nach aktuellem Angebot im Netz abgerufen werden kann. Vor diesem Hintergrund bietet das System einen Ansatz, mit der Herausforderung einer volatilen Stromerzeugung und einem schwankenden Markt umzugehen. Des Weiteren kann durch die Nutzung von Speichertechnologien der Ausbau des Stromnetzes reduziert werden, was wieder Ressourcen einspart.

Bezüglich der Einsparungseffekte der Ressourcen ist die Ressourceninanspruchnahme, die mit dem Zubau der Power-to-Heat-Anlage und der benötigten IT-Technologie verbunden ist, zu berücksichtigen.

Außerdem ist die Umwandlung von Überschussenergie immer mit Verlusten verbunden, die bei der Abwägung zwischen Power-to-X-Anlagen berücksichtigt werden müssen. Wobei der Wirkungsgrad bei der Umwandlung mit PtH-Anlagen mit bis annähernd 100% als sehr hoch bezeichnet werden kann.

**Demografiefestigkeit**

Die notwendige Strom- und Fernwärme-Infrastruktur ist überwiegend netzgebunden und dadurch zum Teil unflexibel bei Änderungen der Bevölkerungsentwicklung.

Eine schrumpfende Bevölkerungsentwicklung und damit verbunden eine potenziell sinkende Nachfrage hat vor allem negative Auswirkungen auf den Wärmebedarf. In diesem Fall müsste das Netz bzw. die Prozesserhitzer angepasst werden.

Im Falle eines erhöhten Bedarfs bei einer wachsenden Gesamtbevölkerung in Ludwigshafen wäre es möglich das Fernwärmenetz auszubauen.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Die Technologie eignet sich für Siedlungsstrukturen mit Potenzial für Fern- und Nahwärmenetze und damit eher für dichte, städtische Strukturen. In ländlichen Regionen wäre die Technologie potenziell installierbar, so existieren in verschiedenen Regionen bereits kleine Nahwärmnetze (z. B. Feldheim). Jedoch ist dies hinsichtlich der eingeschränkten Demografiefestigkeit, dem Investment und dem erhöhten Durchschnittsressourcenverbrauch eher als unwirtschaftlich einzustufen. Insbesondere eignet sich die Technologie für Regionen mit einem starken Stadt-Land-Gefälle, in denen im ländlichen Bereich entsprechende Überschüsse regenerativer Energien anfallen und im städtischen Raum Abnehmer für die produzierte Wärme in direkter Nähe sind. So haben beispielsweise die Stadtwerke Neumünster, als Oberzentrum in Schleswig-Holstein, ebenso eine Power-to-Heat-Anlage mit einer Leistung von 20 MW in Betrieb genommen. Die Anlage profitiert von dem großen Anteil an Überschus-

senergie, die durch Windkraft in der weiteren Region erzeugt wird. Die Wärme wird in Neumünster in ein Fernwärmesystem eingespeist, an das 20.000 Haushalte angeschlossen sind.

**Problembewältigungspotenzial**

Die Power-to-Heat-Anlage hat ein hohes Problembewältigungspotenzial. Der Umbau der Energieinfrastruktur zu „smarten" Systemen ist notwendig angesichts des volatilen Strommarktes. Diese Entwicklung wird zumal von der tendenziellen Dezentralisierung der Energieversorgung verstärkt.

De Wärmeversorgung ist neben der Stromversorgung ein zentrales Thema der Energiewende und des Klimaschutzes. Bislang wurde der Fokus sehr stark auf die „Stromseite" gelegt, obwohl gerade im Bereich der Wärmeversorgung große Einsparungspotenziale liegen. Auch in dieser Hinsicht hat das Projekt Problembewältigungspotenzial. Zudem basiert die Fernwärme immer noch sehr stark auf der Nutzung von Kohle und Gas, wobei mit diesem BPB umweltfreundliche Alternativen angeboten werden.

**Innovationskraft**

Da die Energiewende vermutlich nur mit solchen intelligenten Systemen auf lokaler Ebene umsetzbar sein wird, ist hier der Einsatz von IKT zur Steuerung der Regelenergie hervorzuheben. Denn der zukünftige Markt wird von steuerbaren Energieabnehmern als Pendant zu den fluktuierenden Erzeugern wie Windkraft und Photovoltaikanlagen abhängig sein. Die Power-to-Heat-Anlage kann gut als Baustein eines virtuellen Kraftwerks positioniert werden. Des Weiteren können vorhandene Wärmenetze als Pufferspeicher für Spitzlasten dienen.

Darüber hinaus ist das Projekt in institutioneller Hinsicht innovativ, als dass es den Bedeutungsgewinn und die Rolle der Kommunen auf dem Energiemarkt verdeutlicht (z. B. als Konsument, Prosument, Aggregator).

**Infrastruktureller Kontext**

In diesem Sinne ist das Projekt darauf ausgerichtet, auf Grundlage bereits vorhandener Infrastrukturen eine dezentrale Ausrichtung der Energieversorgung einzuschlagen. Es wird ein zentrales Stromnetz mit einer dezentralen Wärmeerzeugungsanlage gekoppelt und so mehr Autonomie geschaffen. Durch die Kopplung ergeben sich gleichsam Synergieeffekte durch die effiziente Nutzung von Strom- und Wärmeinfrastrukturen.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Da kein umfangreicher Ausbau der Energieinfrastrukturen in diesem BPB betrieben wird, sondern auf die Ergänzung bestehender Infrastruktur gesetzt wird, entsteht i.d.R. keine Beeinträchtigung der Bürger. Die soziale Akzeptanz der Maßnahme scheint damit gegeben.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Investitionskosten lagen in diesem BPB bei 2,7 Mio. Euro. Die Technik PtH ist auch im Vergleich zu Power-to-Gas deutlich kostengünstiger wie auch der Wirkungsgrad besser. Die durch den Zubau entstehenden Kosten dürften durch die Effizienzsteigerung des Systems langfristig aufgefangen werden. Insgesamt sind die Investitionskosten gering, wenn KWK-Anlage und Speicher vorhanden sind.

Die Preisdifferenz zwischen Strom und Gas muss trotzdem als ein Hemmnis im Wärmemarkt eingeschätzt werden. Jedoch gilt, dass bei guten Voraussetzungen hinsichtlich des Absatzmarktes, eine ökonomische Tragfähigkeit gegeben ist, was auch die bereits vorhandenen sowie geplanten Werke bezeugen.

In Neumünster wurde beispielsweise ein Contracting-Modell gewählt. Hier zeigen sich auch durch die Kopplung des Wärme- mit dem Strommarktes positive Effekte auf den wirtschaftlichen Absatz der Produkte der Anlage.

Zusätzlich ist auf das novellierte EEG 2016 zu verweisen, in welchem eine Förderung von Anlagen zur Nutzung von Überschussstrom vorgesehen ist. Mit dem Motto „Nutzen statt Abregeln“ sollen Technologien zur Nutzung von Überschussstrom wie etwa PtH stärker gefördert werden. Auch vor diesem Hintergrund ist das Potenzial der Technik abzuschätzen. Das EEG wurde am 8. Juli 2016 beschlossen, die Reform tritt am 01. Januar 2017 in Kraft, weshalb die Auswirkungen auf den Markt zum jetzigen Zeitpunkt nicht beziffert werden können.

**Link/Kontakt**

Dorett Bausback, Leiterin
TWL Unternehmenskommunikation
fon 0621-505 2005
fax 0621-505 2008
e-mail: presse@twl.de

**Quellen**

http://www.twl.de/de/Unternehmen/Newsroom/Presse/Pressemeldungen1/Pressemitteilungen/TWL-investiert-15-Millionen-in-Power-to-Heat-Anlage.html (10.03.2016).

http://www.industr.com/Energy20-Magazin/de_DE/news/2015-08-3-clens-254840 (10.03.2016).

http://www.energieagentur.rlp.de/fileadmin/user_upload/Pressemitteilungen/20140930_Smart-Grids-Woche_Virtuelles_Kraftwerk_TWL.pdf (10.03.2016).

Vortrag: Die Kommune als Bindeglied zwischen dezentraler Infrastruktur und dem europäischem Energiemarkt, Kongress 100% Erneuerbare Energie Regionen von Matthias Karger, Leiter Business Development bei Clens, 10.-11. November 2015, Kassel.

### 2.1.2 Smart Grids Modellregion Salzburg

Die Smart Grids adressieren die Teilsysteme IKT, Strom, Wärme, Verkehr und Gebäude. „Smart Grids Modellregion Salzburg“ wurde als Best-Practice-Beispiel ausgewählt, da es die Möglichkeit bietet, unterschiedliche Smart Grids-Anwendungen in einem integrierten Gesamtsystem zusammenzuführen (Building to Grid/ Vehicle to Grid). SmartGrids sind intelligente Energienetze, die es ermöglichen, Stromproduktion, -verteilung, -speicherung und –verbrauch aufeinander abgestimmt zu regulieren. Im Zentrum der Modellregion Salzburg stehen vor allem zwei Leuchtturmprojekte: die Neubausiedlung „Rosa Zukunft“ sowie „Köstendorf“ im Salzburger Flachgau.

#### a. Beschreibung der Smart Grids Modellregion Salzburg

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Mit der Modellregion Salzburg soll eine Vernetzung der innovativen technischen Ansätze im Bereich der Energienetze aufgebaut und erprobt werden. Ziel ist es, eine moderne Energieversorgung, die Sonnen-, Wind- und Wasserkraft ausbaut und den Klimaschutz forciert, zudem soll auf verteilte Erzeuger mit schwankendem Energieangebot reagiert werden. Die Stromnetze selbst werden insbesondere mit den Teilsystemen der Haustechnik und der Mobilität verknüpft.

**Technischer Ansatz**

Im Neubaugebiet „Rosa Zukunft“ wird eine intelligente Siedlung mit 130 Wohneinheiten errichtet, in welcher eine entsprechende Leit- und Regeltechnik installiert wird, die sich auf die Erfordernisse des

Netzes abstimmt und den Energieverbrauch optimiert. Im Zentrum steht dabei ein Energiemanagementsystem, das Energieerzeugung und Verbrauch optimiert und Speicher nutzt. Die Energie wird umweltfreundlich mittels Photovoltaik, Blockheizkraftwerk und Wärmepumpen gewonnen. Zusätzlich gibt es auch einen Fernwärmeanschluss.

Die Bewohner der Anlage werden über interaktive Displays oder Applikationen am Smart Phone über ihren Energieverbrauch informiert und können diesen so gezielter steuern und Energievergeudung vermeiden. Ein Teil der Wohnungen erhält als „Monitoringwohnungen" zusätzliche smarte Elemente: beginnend von einer Anzeige des jeweils aktuellen Strom-, Wärme- und Wasserverbrauchs über einen Eco-Button, mit dem man definierte Geräte beim Verlassen der Wohnung mit einem Knopfdruck ausschalten kann, eine intelligente Steuerung der Heizanlage, die innerhalb gewisser Grenzen eine Vorregulierung über Internet oder Smartphone erlaubt, bis hin zum kompletten Monitoring von Temperatur, Feuchtigkeit und $CO_2$-Gehalt der Luft, das Hinweise zur Verbesserung des Lüftungsverhaltens zulässt.

Auch ein innovatives Car-Sharing Modell mit vier Elektroautos sollte in einer vierjährigen Versuchsphase getestet werden (ab 2013). Zwei der Autos stehen für vier Haushalte zur Verfügung, die dazu auch einen finanziellen Beitrag leisten. Hierfür steht ein online Buchungssystem zur Verfügung, vorgesehen waren kosten von 169 Euro/Monat. Ergänzend zum Car-Sharing wurden den Bewohnern kostenfreie ÖPNV-Jahrestickets angeboten. Des Weiteren können E-Bikes genutzt werden. Die Wohnkoordination der Diakonie wird ebenfalls mit einem E-mobil ausgestattet, und als technische Neuerung sollen unter anderen induktive Ladestellen für Elektrofahrräder erprobt werden.

Im Projekt „Köstendorf" (insg. 90 Testhaushalte) wurden vor allem Photovoltaik-Anlagen auf 43 Häusern errichtet, 36 Elektroautos bereitgestellt, und ebenso Datenleitungen eingerichtet, die Informationen zwischen Kunden und Energieversorger übertragen.

#### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Übergeordnetes Ziel der Modellregion ist die Sicherstellung der Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs.

#### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Unterstützung durch den Klima- und Energiefonds des Bundes Österreich.

#### Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)

Salzburg ist Landeshauptstadt und mit ca. 150.000 Einwohnern die viertgrößte Stadt Österreichs. Die Region ist urban und wachsend. Die Einwohnerzahl von Salzburg wird laut Statistik Austria bis 2060 um 8 % steigen.[99] Köstendorf ist mit 2.500 Einwohner ländlich geprägt.

#### Innovationsgehalt/-kern

Es werden verschiedene Smart Grids-Anwendungen in einem integrierten Gesamtsystem zusammengeführt (Building to Grid/ Vehicle to Grid).

#### Governance/Steuerungsebene und Akteure

Salzburg AG (Projektpartner: Salzburg Wohnbau GmbH, Siemens AG, Gemeinnützige Wohn- und Siedlungsgenossenschaft „salzburg", Stadt Salzburg)

- Initiator: Salzburg AG

99 https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und-_gesellschaft/bevoelkerung/demographische_prognosen/bevoelkerungsprognosen/index.html#index1 (05.04.2016).

- Zielgruppen/Adressat: Wohnungssuchende Bürger Salzburgs/Neubürger.

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Die Siedlung in Salzburg wurde Ende 2013 fertiggestellt. Auch die Umrüstung in Köstendorf ist abgeschlossen und soll nun noch einmal aufgestockt werden („Köstendorf 3.0"). Laut Salzburg AG sind „die ersten Erfahrungen […] sehr positiv". So funktioniert etwa die Leittechnik ohne große Probleme. Nutzer der App konnten im ersten Jahr 10 bis 15 Prozent Energiekosten einsparen.[100,101] Das Mobilitätskonzept in Salzburg (ÖPNV und E-Autos) wurde von den Bewohnern und potenziellen Nutzern bisher nicht gut angenommen.

### b. Bewertung der Smart Grids Modellregion Salzburg

**Ressourcenleichtigkeit**

Smart Grids erzielen vor allem eine Reduktion des Stromverbrauchs, aber auch des Wärme- und Wasserverbrauchs. Durch entsprechende Leit- und Regeltechnik wird die Nutzung optimiert, wodurch fossile Brennstoffe eingespart und somit auch Emissionen von $CO_2$- und Luftschadstoffen reduziert werden. Smart Grids können somit einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten, der bis auf die Endverbraucher einwirkt.

Auch das Car-Sharing-System trägt zur Ressourceneinsparung bei. Weniger Fahrzeuge werden eingesetzt und die Nutzer sind in der Regel intermodal unterwegs. Dies hat einen geringeren Ressourcenverbrauch zur Folge. Das Car-Sharing System wirkt auch ressourcenschonend, da die Nutzung eines entsprechenden Fahrzeuges stets die Abwägung mit anderen Mobilitätsangeboten bestehen muss. Es ist zu beobachten, dass Fahrzeuge insgesamt weniger bewegt werden, als es im Falle von Privat-PKW's der Fall ist. Im konkreten Beispiel in Salzburg war die Umsetzung des Mobilitätskonzepts bisher nicht erfolgreich. Die Nachfrage für die Nutzung von Elektromobilen war bisher sehr gering, es wird überlegt das System anzupassen und Vermietungen stundenweise anzubieten. Auch die Nachfrage nach kostenlosen ÖPNV-Jahrestickets war gering. Die Nachfrage nach den E-Bikes war hingegen hoch.

Ressourcen werden durch den Aufbau neuer Infrastruktur verbraucht, insbesondere für die Installation und Betrieb der Smart Grids, sowohl für die Netze als auch für die aufwendige IKT. Eine Abwägung wurde in der Smart-Grid Modellregion Salzburg nicht durchgeführt.

**Demografiefestigkeit**

Die aufgebaute Infrastruktur betrifft die Energieproduktion, die Speicherung, die Steuerung und die Nutzung und ist somit umfassend. Das System ist unvermeidlich teilweise netzgebunden (Produktion, Speicher und Nutzung) und somit eingeschränkt demografiefest. Flexibel sind insbesondere das Smart-Grid-Management und das Mobilitätssystem.

Bei einem Rückgang der Bevölkerung sind die infrastrukturabhängigen Systembestandteile betroffen und müssten baulich/technisch angepasst werden. Dies hätte einen erheblichen Einfluss auf die Ressourcenbilanz. Vor allem sind hier die Fernwärmeinfrastruktur und die BHKW zu nennen. Letztere sind i.d.R. nach 15 Jahren abgeschrieben[102] und haben eine Lebensdauer bis ca. 20 Jahre[103]. Die Pla-

100 Auch in Köstendorf gab es Erfolge, so nutzt in einem Ortsteil die Hälfte der Bewohner nur mehr Elektroautos und hat PV-Anlagen installiert. "Der Einsatz von Smart-Grids-Technologien hat hier gezeigt, dass diese nur halb so teuer sind wie konventionelle Lösungen". Des Weiteren wurde eine breite soziale Mischung erreicht, Gemeinschaftsräume werden genutzt. Siehe: http://www.profil.at/portfolio/smart-city-hype-was-stadt-zukunft-5600290 (30.08.2016).

101 http://www.smartgridssalzburg.at/content/website_smartgrids/de_at/projekte.html (30.03.2016).

102 Siehe: VDI-Richtlinie 2067. Die steuerlichen Abschreibungen wurden in 2015 auf 50 Jahre – gleich Gebäuden – angepasst.

nungshorizonte könnten somit unter Umständen von der demografischen Entwicklung eingeholt werden.

Eine Anpassung der IKT-gestützten Managementlösungen ist möglich. Auch die Mobilitätsinfrastruktur (e-mobility) kann aufgrund der Flexibilität als demografiefest bezeichnet werden.

Auf eine zunehmende Bevölkerung können alle Systemteile reagieren, von einer Anpassbarkeit ist auszugehen. Hier ergeben sich keine Hemmnisse.

Zusätzlich ist im Fluchtpunkt des demografischen Wandels aufzuführen, dass ältere Menschen tendenziell mit der technischen Anwendung/Steuerung des Systems Probleme haben können. Die Entwicklung geht jedoch eher in Richtung einer digital-affinen Bevölkerung.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Smart Grids sind aufgrund ihrer technischen Komplexität vor allem in urbanen und suburbanen Räumen anzufinden (z. B. technikaffine Bevölkerung, Kosten). Zudem eignen sie sich eher für stabile oder wachsende Regionen. Sie eignen sich vor allem für Neubaugebiete, da eine Aufrüstung im Bestand zwar möglich, jedoch ökonomisch und hinsichtlich der Ressourceneffizienz fraglich ist (siehe Ressourcenleichtigkeit).

Mit dem Projekt Köstendorf wird auch eine Anwendung des Systems in ländlicher Gegend erprobt und hat durchaus Erfolge zu verbuchen. So läuft das Netz trotz der vielen Herausforderungen ohne Probleme (zudem Aufbau PV, Nutzung E-Mobilität). Hier liegt die durchschnittliche Ressourceninanspruchnahme für den Aufbau der Infrastruktur jedoch aufgrund der geringeren Siedlungsdichte entsprechend höher. Durch intelligente Kopplung mit anderen dezentralen Infrastrukturen könnten solche Effekte aufgefangen werden, beispielsweise im Falle effektiver Energieproduktionsmöglichkeiten. Trotzdem muss der Einsatz hinsichtlich der Ressourcenleichtigkeit weiter erprobt werden.

**Problembewältigungspotenzial**

Grundsätzlich sind Smart Grids ein vielversprechender Ansatz zur effektiveren Verteilung der Energie und zur Reduktion der Verbräuche (z. B. Energie). Dabei adressieren sie nicht allein ein Teilsystem, sondern sowohl Strom-, Wärme- als auch Wasserinfrastrukturen. Gerade die Sektorkopplung kann Synergien erzeugen und eine systemische Abstimmung ermöglichen. Zudem adressiert das Projekt alle Ebenen eines Infrastruktursystems, von der Produktion bis zum Endverbraucher, sodass auch hier eine Optimierung der Abläufe möglich ist. Das Problembewältigungspotenzial hängt vor allem an dem ‚Wie' der Energieproduktion und der Beseitigung entsprechender Hemmnisse (z. B. Kosten) für den Aufbau solcher Systeme im Bestand.

**Innovationskraft**

Das Projekt weist eine hohe Innovationskraft auf, deren Praxistauglichkeit sich jedoch noch erweisen muss. Sowohl in technischer Hinsicht – die Kopplung der verschiedenen Sektoren unter Einsatz von IKT – als auch in sozialer Hinsicht – Nutzung von privaten Smart Phones zur Steuerung, Selbstoptimierung der Verbräuche – kann Smard Grids Salzburg als innovativ bezeichnet werden.

**Infrastruktureller Kontext**

Die infrastrukturelle Ausrichtung muss, nach dem bisher Ausgeführten, hinsichtlich der Steuerung als eher zentral beschrieben werden. Dabei ist ein Zubau zu bestehenden Infrastrukturen nur begrenzt möglich, da ein umfassender Umbau des Bestandes Herausforderungen mit sich bringt. In größerem

103 Zeitung für kommunale Wirtschaft (ZfK), August 2015. (siehe: https://www.zfk.de/energieeffizienz/kwk-fernwaerme/artikel/system-kommt-durcheinander.html) (30.03.2016).

Umfang muss ein Neubau von Netzen geschehen sowie IKT installiert werden, die jedoch dezentral – bis zur Wohnungsebene – organisiert sein kann.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Die soziale Akzeptanz ist aus mehreren Gründen schwer abschätzbar. Das IKT basierte System kann als mögliche Hürde genannt werden, insofern sich die Steuerung der Versorgungsinfrastruktur auch für den Bürger kompliziert. Erste Erfahrungen aus Salzburg zeigen, dass die Reibungslosigkeit der Abläufe vor allem an allzu Menschlichem wie passivem Widerstand gegen das Übermaß an steuernder Technologie und an der Komplexität der Systeme selbst scheitern kann. Zu erwähnen ist auch, die umfängliche Datenermittlung über Nutzungsverhalten, welche aus Datenschutz- und Datensicherheitsgründen gleichsam umstritten ist. Das System wird tendenziell eher von einer technikaffinen Bevölkerung positiv aufgenommen.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die ökonomische Tragfähigkeit ist schwer abzuschätzen. Das Projekt wurde umfassend mit Fördergeldern unterstützt und allein der Aufbau der IKT ist in diesem Umfang wahrscheinlich noch nicht ökonomisch tragfähig. Jedoch ist hier ein Markt zu erwarten, was an den Aktivitäten großer privatwirtschaftlich organisierter Unternehmen wie Siemens zu sehen ist, die in diesem Feld sehr aktiv sind. So ist mittelfristig wohl eine ökonomische Tragfähigkeit einzelner Elemente des Projektes (z. B. Lastmanagement, E-Bikes) auch positiv zu bewerten, eine umfängliche Umrüstung des Bestands jedoch nicht zu erwarten.

**Link/Kontakt**

salzburg reg. Gen.m.b.H.,
Ignaz-Harrer-Strasse 35, 5020 Salzburg
fon 0662/431221- 48
www.die-salzburg.at
http://www.rosazukunft.at/

**Quellen**

http://www.ooe-zukunftsakademie.at/Roland_Wernik_ZukunftWohnen_24022014.pdf (30.03.2016).

http://www.smartgridssalzburg.at/content/website_smartgrids/de_at/projekte.html (24.03.2016).

https://www.salzburg-ag.at/innovation/smart-grids/ (24.03.2016).

https://www.e-control.at/documents/20903/388512/05_Smart-Grids_Strebl_SalzburgNetz_web.pdf/d34aba6b-bea6-4acd-b343-0be8dd485fc5 (30.03.2016).

### 2.1.3 Virtuelles Kraftwerk der ABG Frankfurt Holding und der Mainova AG

Das Virtuelle Kraftwerk der ABG Frankfurt Holding adressiert die Teilsysteme IKT, Wärme und Strom. Die ABG Frankfurt Holding und die Mainova AG haben im April 2012 Frankfurts erstes Virtuelles

Kraftwerk mit BHKW gestartet. Es werden zunächst zehn BHKW in verschiedenen Liegenschaften der ABG vernetzt. Durch die zentrale Steuerung der BHKW soll die Erzeugung der Wärme möglichst auf die Zeiten verschoben werden, in denen Strom im Netz benötigt wird. Diese zeitliche Flexibilisierung der Wärmeerzeugung bzw. Entkoppelung vom kurzzeitigen Bedarf erfolgt durch Warmwasserspeicher. Das Virtuelle Kraftwerk verwendet als Indiz für das Stromangebot aus Wind und Sonne den Strompreis an der Leipziger Börse EEX. Über einen Fahrplan soll die Stromerzeugung in die „teuersten“ Stunden verlagert werden. Das Virtuelle Kraftwerk der Mainova und ABG soll weiter wachsen und weitere bestehende BHKW in das Netzwerk einbinden, unabhängig von Hersteller, Typ und Baujahr.

**Virtuelles Kraftwerk – Beispiel NEXT Kraftwerke**

Das Prinzip des Virtuellen Kraftwerks wird nicht nur im kommunalen Kontext, wie es hier für Frankfurt exemplarisch erläutert wird, umgesetzt, sondern stellt ein unterdessen gängiges Geschäftsmodell dar. Neben dem Frankfurter Modell existiert beispielsweise ein durch die NEXT Kraftwerke GmbH betriebenes Virtuelles Kraftwerk, das eines der größten seiner Art in Europa ist. Dieses besteht aus einer Vielzahl von dezentralen Energieerzeugern – etwa Biogas-, KWK-, Windkraft-, Solar- und Wasserkraftanlagen – deren Zusammenwirken nicht regional beschränkt ist. Tausende Erzeuger werden deutschlandweit zusammengeschaltet. So können durch eine gemeinsame Strom- und Regelenergievermarktung zum einen „gute" Preise am Markt erzielt werden, zum anderen kann durch die Bereitstellung von Regelenergie die Netzstabilität gesichert werden. Der Strom wird darüber hinaus mittels intelligenter Fernwirktechnik und den daraus resultierenden Koordinierungsmöglichkeiten wesentlich effizienter produziert.

### a. Beschreibung Virtuelles Kraftwerk der ABG Frankfurt Holding und der Mainova AG

#### Adressierte Probleme und Herausforderung

Um eine klimafreundliche Energieversorgung in Deutschland sicherzustellen, müssen Anlagen zur Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien installiert werden, deren Kapazitäten deutlich über dem Regelverbrauch liegen müssen. Dies führt dazu, dass bei spezifischen Wetterlagen deutlich mehr Strom produziert als benötigt wird. Die Erzeugung von Strom aus Sonne und Wind unterliegt (wetterbedingt) hohen Schwankungen (Volatilität). Des Weiteren wurden Überkapazitäten bislang nicht umfassend genutzt, bzw. vorhandene Infrastrukturen werden temporär abgeregelt. Der Strommarkt wird zunehmend dezentraler und kleinteiliger. Die Herausforderung besteht darin, die volatile Stromerzeugung und die Verbräuche auszugleichen, damit die Stromversorgung stabil betrieben werden kann. Flexibilitätsoptionen zum Umgang mit der volatilen Erzeugung von EE-Strom sind z. B. Lastmanagement und Speicher.

Das Virtuelle Kraftwerk adressiert den Ausgleich von Produktions- und Bedarfsschwankungen in den Energienetzen.

#### Technischer Ansatz

Die gasbetriebenen Kleinmotoren der Kraftwerke produzieren gleichzeitig Strom und Wärme. Bislang erzeugen sie den Strom dann, wenn im Haus Wärme benötigt wird. Zunächst soll eine zentrale Steuerung die Leistungen der einzelnen Anlagen bündeln und sie aufeinander abstimmen. Im Verbund dieses Virtuellen Kraftwerks wird die schwankende Stromerzeugung von Erneuerbaren Energien ausgeglichen.

Das Virtuelle Kraftwerk von ABG und Mainova ermöglicht es, bestehende BHKW in das Netzwerk einzubinden. In Frankfurt gibt es nach Recherchen des Energiereferats Frankfurt rund 200 BHKW mit einer Gesamtsumme an elektrischer Leistung von ca. 25 MW, die in das Virtuelle Kraftwerk integriert werden könnten. Das Energiereferat beziffert zudem das zusätzliche Potenzial an BHKW in Frankfurt mit 40 MW.

Ein weiterer Vorteil des Virtuellen Kraftwerks ist es, dass diese Infrastruktur weitere Nutzungsmöglichkeiten zulässt. So kann der Strom nicht nur zur Direktvermarktung, sondern auch zur Bereitstellung von Regelenergie, zur Netzlast-Optimierung oder Bilanzkreis-Optimierung eingesetzt werden.

#### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Durch zentrale Steuerung der BHKW soll die Erzeugung der Wärme möglichst effizient gestaltet werden. Die ABG hat wirtschaftliche Interessen.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

-

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/schrumpfend/wachsend)**

Die Stadt Frankfurt ist urban geprägt und ist eine wachsende Stadt. Die Bevölkerung wird nach Schätzungen der Bertelsmann-Stiftung bis 2030 um 14,2 % wachsen.

**Innovationsgehalt/-kern**

Das Virtuelle Kraftwerk ermöglicht eine effizientere Allokation von Energie, wobei es bestehende BHKW integrieren kann.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Entwicklungspartnerschaft von der ABG Frankfurt Holding, Mainova, den Stadtwerken Aalen und der Lübecker Softwarefirma cbb. Hervorzuheben ist hier die Zusammenarbeit der kommunalen Wohnungsbaugesellschaft AGB mit dem kommunalen Energieunternehmen Mainova, das deren BHKW nutzt. Für ABG Geschäftsführer Frank Junker ist dieses Projekt ein Beispiel für „gelebte Kommunalwirtschaft".

- Zielgruppen/Adressat: Frankfurter Energiekonsumenten und –erzeuger

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Das virtuelle Kraftwerk befindet sich im Betrieb.

### b. Bewertung Virtuelles Kraftwerk der ABG Frankfurt Holding und der Mainova AG

**Ressourcenleichtigkeit**

Das Virtuelle Kraftwerk basiert auf existierenden Anlagen, die IT-basiert vernetzt werden und deren Funktion für das Gesamtsystem optimieren. Diese Systemoptimierung erhöht die Effizienz des Stromnetzes, führt zunächst zu einem geringeren Bedarf an zusätzlichem Energiegewinn auf Grundlage fossiler Energieträger. Der Leitungsausbau kann langfristig reduziert werden. Es werden also zum einen Ressourcen eingespart (Materialien, Energie, Fläche), zum anderen THG- und Luftschadstoff Emissionen verringert.

Wird die Energie aller Anlagen nicht regenerativ erzeugt, so bewirkt das Virtuelle Kraftwerk lediglich eine Einsatzoptimierung. Sie würde immer noch einen Beitrag zu Ressourcenoptimierung leisten können aber nicht im Bereich der Treibhausgasemissionen.

**Demografiefestigkeit**

Kern des Virtuellen Kraftwerks ist ein IKT-basierter Steuerungsprozess bestehender Anlagen. Dem Virtuellen Kraftwerk können weitere Erzeugungsanlangen (BHKW) zugefügt oder ausgegliedert werden. Das Virtuelle Kraftwerk kann als demografiefest eingestuft werden, da eine negative Bevölkerungsentwicklung keinen Einfluss auf das Hauptelement des Systems, die IKT, hat.

Eine Anpassung des Systems und die Integration weitere BHKW im Falle einer wachsenden Bevölkerung erscheint problemlos und wird in der Realität in Frankfurt auch geplant.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Auch hier zeigt sich die Differenz zwischen dem Virtuellen Kraftwerk selbst und der damit mittelbar zusammenhängenden Infrastruktur. Das Kraftwerk selbst, als IKT-basierter Steuerungsprozess, ist

prinzipiell auf alle Raumtypen übertragbar. Indirekt ist es jedoch abhängig von (vorhandener) Infrastruktur an BHKW (in der Region) oder anderen Energieerzeugern und daher eher auf urbane und suburbane Regionen in der Praxis anwendbar.

**Problembewältigungspotenzial**

Die Einrichtung eines virtuellen Kraftwerks besitzt Problembewältigungspotenzial, da es die Netzstabilität sichert und Ressourcen effizient nutzt. Gerade für die Übergangsperioden, in denen nach wie vor Energie aus fossilen Brennstoffen gewonnen wird, ist das Virtuelle Kraftwerk ein sehr nützliches Instrument zum effizienteren Einsatz von Energie und der Reduktion von THG- Emissionen und Luftschadstoffen.

**Innovationskraft**

Als innovativ ist das virtuelle Kraftwerk zunächst hinsichtlich des IKT-Einsatzes zu bewerten. Die Technik ist so ausgelegt, dass grundsätzlich alle bestehenden BHKW in Frankfurt und der Rhein-Main-Region in das System integriert werden können, unabhängig von ihrer Größe, Hersteller oder Alter. Außerdem vernetzt es vorhandene Infrastruktur und somit auch Anbieter und Erzeuger intelligent miteinander und ist so auch in institutioneller Hinsicht eine Neuerung.

Neben den virtuellen Kraftwerken gibt es inzwischen erste Versuche, virtuelle Energiespeicher zu etablieren. Das BMWi fördert das Projekt „Die Stadt als Speicher“ in Herten und Wunsiedel. In städtischen Anlagen (z. B. in der Nutzung von BHKW, Wärmepumpen) soll Überschussstrom aus Wind/Solar durch Nutzung von Verschiebepotenzialen virtuell zwischengespeichert werden. Dies zeigt, dass „virtuelle“ Technologien eine immer größere Rolle im Energiemarkt spielen werden.

**Infrastruktureller Kontext**

Zwar ist die IKT als solche zentral, dies hat jedoch keinerlei Auswirkungen auf das System, weil es punktuell und leicht anpassbar ist. Die Energieerzeuger sind in diesem Falle sämtlich BHKW, also dezentral, sodass auch das gesamte System strukturell dezentral ist.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Der Aufbau von physischer, neuer Infrastruktur ist nicht notwendig, es wird lediglich auf bereits bestehende Infrastruktur zurückgegriffen. Das Virtuelle Kraftwerk bringt keine Belastungen für Nutzer, sondern Vorteile für Nutzer. Die Effizienzsteigerung des Systems wirkt sich hier eher positiv aus.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Da die feste Infrastruktur bereits gegeben war, fielen lediglich Investitionen für die Steuerungssoftware an. Aufgrund der marktförmigen Umsetzung des Projektes scheint eine ökonomische Tragfähigkeit hierfür gegeben. Diese ist auch angesichts der Effizienzsteigerung des Systems und der sich hierdurch verbesserten Marktsituation der beteiligten Unternehmen nachvollziehbar.

**Link/Kontakt**

ABGnova Energie-Beratungszentrum
Ginnheimer Straße 48, 60487 Frankfurt/Main
Bernd Utesch
fon 069 213 84101

### Quellen

http://www.hessen-it.de/mm/mm001/CO2_Final.pdf (10.04.2016).

http://www.abgnova.de/aktionen/virtuelles_kraftwerk.php?&print=true (10.04.2016).

## 2.1.4 Hybrides-Kraftwerk Prenzlau – Wasserstoff-Wind-Biogas

Das Hybrid-Kraftwerk adressiert die Teilsysteme Strom, Gas und Wärme. Seit Oktober 2011 betreibt das Energieunternehmen ENERTRAG das weltweit erste Wasserstoff-Wind-Biogas-Hybridkraftwerk in Prenzlau in der Uckermark. Ein Teil der Hybridanlagen ist als Energiespeicher ausgelegt. Das Kraftwerk besteht aus drei Windturbinen, einer Erzeugungsanlage für Wasserstoff, einer Biogasanlage und zwei Blockheizkraftwerken (BHKW), die Strom und Wärme erzeugen. In Zeiten hohen Windaufkommens wird der erzeugte Windstrom zur Wasserstoffproduktion genutzt und gespeichert. Weht kein Wind, wird der erzeugte Wasserstoff mit Biogas gemischt und in den BHKW in Strom und Wärme umgewandelt. Außerdem soll produzierter Wasserstoff in Zukunft an Zapfsäulen von Berliner Wasserstofftankstellen angeboten werden. Fünf Total-Tankstellen in Berlin und Hamburg wird das Prenzlauer Werk mit „Windgas“ beliefern.

### a. Beschreibung Hybrides Kraftwerk Prenzlau

#### Adressierte Probleme und Herausforderung

Um eine klimafreundliche Energieversorgung in Deutschland sicherzustellen, müssen Anlagen zur Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien installiert werden, deren Kapazitäten deutlich über dem Regelverbrauch liegen. Dies führt dazu, dass bei spezifischen Wetterlagen deutlich mehr Strom produziert als benötigt wird. Die Stromerzeugung unterliegt wetterbedingt hohen Schwankungen (Volatilität). Des Weiteren wurden Überkapazitäten bislang nicht umfassend genutzt, bzw. vorhandene Infrastrukturen werden temporär abgeregelt. Der Strommarkt wird zudem dezentraler und kleinteiliger. Die Herausforderung besteht darin, die volatile Stromerzeugung und die Verbräuche auszugleichen, damit die Stromversorgung stabil betrieben werden kann. Flexibilitätsoptionen zum Umgang mit der volatilen Erzeugung von Strom aus Wind/Sonne sind z. B. Lastmanagement und Speicher. Das Hybrid-Kraftwerk adressiert eine Erhöhung der Auslastung von Windkraftanlagen durch die Umwandlung von Überschussstrom, Speicherung und die Kopplung mit flexiblen Erzeugungsanlagen (BHWK).

#### Technischer Ansatz

Durch ein „Power-to-Gas“ Elektrolyse-Verfahren wird die überschüssige Windenergie genutzt, um Wasser in seine chemischen Bestandteile, Sauerstoff und Wasserstoff, aufzuspalten. Der gewonnene Wasserstoff wird dann in das bestehende Gasnetz eingespeist. Umgewandelt in Wasserstoff lässt sich die Energie dort langfristig speichern und kann in windschwachen Zeiten wieder in Strom umgewandelt werden.

Neben Windkraft und Wasserstoff ist Biogas als dritter Energieträger an die Stromerzeugung gekoppelt. Bei hohem Bedarf an Strom kann der Wasserstoff mit Biogas in Blockheizkraftwerken rückverstromt werden. Das Hybridwerk liefert also auch in windärmeren Zeiten, wenn nur wenig Strom aus regenerativer Wind-Energie erzeugt wird. Es hilft damit Versorgungslücken auszugleichen.

#### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Ziel ist es einen effizienten Stromspeicher zu entwickeln, um den Überschussstrom langfristig zu speichern und damit die Netzstabilität zu gewährleisten.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

Die Investitionskosten beliefen sich auf ca. 21 Millionen Euro.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Prenzlau hat um die 20.000 Einwohner und liegt im Landkreis Uckermark (nord-östlich von Berlin). Der Landkreis wird nach Angaben der Bertelsmann-Stiftung bis 2030 um 14,2% schrumpfen.

**Innovationsgehalt/-kern**

Innovationskern des Hybridkraftwerks ist die Kombination aus Wasserstoff, Windenergie und Biogas. Hiermit wird eine grundlastfähige Technologie bereitgestellt.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

ENERTRAG

- Initiator: ENERTRAG
- Zielgruppen/Adressat: Adressiert werden Haushalte in Prenzlau (Strom-/ Wärmekunden) sowie Gas-Tankstellenbetreiber (bzw. Nutzer eines Gas betriebenen Autos).

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Laut Investor ENERTRAG wird die Stadt Prenzlau mit 600 Haushalten künftig durch das 6-Megawatt-Pilotprojekt versorgt. Zudem werden rund 400 Kilogramm Wasserstoff monatlich abgegeben. Dies reiche für 40.000 Fahrkilometer für PKW.

**b. Bewertung Hybrides Kraftwerk Prenzlau**

**Ressourcenleichtigkeit**

Das hybride Kraftwerk Prenzlau ist ein Beispiel für die Kopplung von regenerativer Kraftwerksleistung und Umwandlungsanlagen-Kapazität. Durch die Möglichkeit der Umwandlung von Überschussstrom in Wasserstoff wird eine optimierte Auslastung der Windkraftanlagen gefördert. Auf diese Weise werden fossile Brennstoffe eingespart und somit Emissionen an THG und Luftschadstoffen verringert. Außerdem kann mittels des Energiespeichers auf den volatilen Strommarkt reagiert werden. Letztlich stellt das Hybridkraftwerk zusätzlich Wärme bereit und deckt damit den gesamten Energiesektor mittels regenerativer Träger ab.

Teilweise kann für das System vorhandene Infrastruktur zur Speicherung der Energie genutzt werden. Teile des Kraftwerks müssen zugebaut werden, vorhandene Netze können genutzt werden.

Durch die angestrebte institutionelle Kooperation mit Berliner Tankstellen zwecks Einspeisung des Wasserstoffs in den Mobilitätsmarkt (regionales Verteilermodell) wird es potenziell auch hier zur Ersparnis im Bereich der Primärenergie kommen. Auf diese Weise darf auch für den Mobilitätssektor ein geringerer Bedarf an Netzausbau vermutet werden, da mit der Produktion von Wasserstoff alternative, netzausbauintensive Mobilitätslösungen substituiert werden.

**Demografiefestigkeit**

Das System ist durch die Produkte Fernwärme und Strom zum größten Teil netzgebunden. Dies bezieht sich u.a. auf die Anlageninfrastruktur mit Windkraft, Biogasanlage, BHKW und Elektrolyse. Insofern ist die Demografiefestigkeit eingeschränkt. Flexibel und damit demografiefester ist der Einsatz von Wasserstoff sowohl als Speichermedium als auch für den Mobilitätssektor.

Gewisse Flexibilitäten bestehen im System bei der Steuerung von Überschussenergie durch Speicherung, Wasserstoffproduktion und einer möglichen Rückverstromung. Durch die Umwandlungsmöglichkeit kann besser auf Schwankungen im Energiebedarf reagiert werden, wobei langfristige demografische Entwicklungen hiermit eher nicht aufgefangen werden können; in diesem Falle wäre ein Zubau von Speicherkapazität und Verteilernetzen nötig. Für den Mobilitätssektor gilt, dass Wasserstoff flexibel transportierbar ist; also auch an anderen Orten mit Nachfrage bereitgestellt werden könnte. Die produzierte Abwärme wird in ein Fernwärmenetz eingespeist, das bei abnehmenden Anschlüssen ebenso zu baulichen/technischen Adaptionen führen könnte.

Zu beachten ist jedoch, dass die Region um Prenzlau eine Schrumpfungsregion ist und auch in solchen Fällen – integriert in Stadtentwicklungsprozessen – der Aufbau solcher Infrastrukturen möglich ist.

Das System ist unkritisch für wachsende Siedlungsstrukturen geeignet und kann mit Bezug auf den Absatz aller Produkte (Wärme, Strom, Wasserstoff) ausgeweitet werden.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Das Hybridkraftwerk ist auf alle Raumtypen übertragbar, da nicht die Siedlungsstruktur ausschlaggebend ist, sondern die Netzanbindung und eine potenzielle Produktion von Überschussenergie. Das Kraftwerk kann sowohl im urbanen, wie im ländlichen Raum angesiedelt werden – von Vorteil ist, wie beschrieben, eine regionale Nachfrage oder aber bestehende Netzinfrastrukturen zur überregionalen Übertragung.

**Problembewältigungspotenzial**

Das Hybridkraftwerk besitzt durch die grundlastfähige (Speicher-)technik Potenzial bei der Bewältigung der Energiewende. Das System ist ein intelligenter Ansatz im Umgang mit dem volatilen Energiemarkt. Insbesondere die Bandbreite an Produkten (Wärme, Strom, Wasserstoff) ist hier positiv hervorzuheben, weil dadurch eine hohe Flexibilität gewährleistet wird und somit eine Effizienzsteigerung wahrscheinlich ist. Gerade Wasserstoff bietet die Möglichkeit Energie auch langfristig zu speichern und besitzt somit ein gutes Problembewältigungspotenzial.

**Innovationskraft**

Die intelligente Nutzung von Überschussstrom durch den flexiblen Einsatz von Energieträgern ist der Innovationskern des Beispiels. Dies trägt zu einer Optimierung des Energiemanagements in der Region bei. Die Kopplung von drei Energiesektoren ist zudem auch technisch sehr innovativ. Auf diese Weise kann flexibel, je nach Bedarf, Energie in unterschiedlichen Trägerformen bereitgestellt werden. Hybridkraftwerke sind daher als solche innovativ, jedoch bislang noch nicht weit verbreitet.[104] Eine ähnliche Anlage ist beispielsweise auf der Insel Pellworm verwirklicht. Dort wurde das System zusätzlich um Speichertechnologie (Lithium-Ionen-Batterie und eine Redox-Flow-Batterie) ergänzt, da es nicht die Möglichkeit besitzt Wasserstoff zu erzeugen. Prinzipiell stellt ein Hybridkraftwerk, wie es dieses Beispiel zeigt, eine Alternative zu ressourcenaufwändigen Batteriesystemen dar, da es erneuerbare Energie auch als Kraftstoff für PKW's etc. umwandeln kann. Zu beachten bleibt, dass jede Umwandlung auch einen Energieverlust bedeutet.

Wasserstoff kann im Bereich der Mobilität zukünftig eine wichtige Rolle einnehmen, da er auch für lange Fahrstrecken incl. Warentransport geeignet ist. Innovativ ist das Projekt auch in institutioneller Hinsicht, insofern eine direkte Kooperation mit regionalen Abnehmern des Wasserstoffs angestrebt wird.

104 Der Windpark Werden/Kessin zählt aufgrund eines integrierten kleinen Prototypen zur Wasserstoffspeicherung sowie eines Blockheizkraftwerkes zur Wiedernutzung zu den Hybridkraftwerken.

**Infrastruktureller Kontext**

In infrastruktureller Hinsicht kombiniert die Produktion der Energie Elemente sowohl der dezentralen als auch der zentralen Versorgung. Die BHKW etwa sind ein typischer Baustein dezentraler Energieversorgung. Gleichsam ist die Produktion von Wasserstoff einzustufen. Dennoch bleibt das Kraftwerk auf zentrale Netze angewiesen. Die Nutzung ist in der Regel dezentral ausgerichtet (z. B. Wasserstoff für Mobilität).

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Das Kraftwerk (u.a. BHKW, Speicher) hat keinen direkten Einfluss auf die Bürger, sodass auch keine Problematik hinsichtlich der sozialen Akzeptanz zu erwarten ist. Die im Beispiel zugeschalteten Windkraftanlagen bieten indirekt Konfliktpotenzial, wären jedoch durchaus durch andere Energiequellen substituierbar.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Investitionskosten lagen insgesamt bei 21 Mio. Euro. Zu beachten ist die Vorreiterrolle; es ist das erste Werk in dieser Art, sodass kein standardisierter Markt für einen entsprechenden Kraftwerksbau existiert.

Insgesamt gilt die Power-to-Gas Technologie als teuer. Eine ökonomische Tragfähigkeit scheint derzeit nicht gegeben. Inwieweit sich ein tragfähiger Markt bildet – auch für Wasserstoff – ist schwer abzuschätzen.

**Link/Kontakt**

ENERTRAG
17291 Dauerthal
fon +49(0) 39854–6459-0
e-mail ENERTRAG@ENERTRAG.com

**Quellen**

https://www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html# (10.04.2016).

http://kraftwerkforschung.info/quickinfo/hybridkraftwerke/hybrid-premiere-als-energiespeicher/ (10.04.2016).

http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/energie-verluste-wasserkraft-soll-verpuffenden-strom-speichern-a-798495.html (10.04.2016).

http://www.focus.de/wissen/klima/tid-24018/hybridkraftwerk-in-prenzlau-kosten-und-nutzen_aid_678478.html (10.04.2016).

http://www.nordkurier.de/prenzlau/wasserspalter-machen-sich-wind-zunutze-1211682612.html (10.04.2016).

### 2.1.5 Regionales Regelkraftwerk Feldheim (RRKW)

Das Batteriekraftwerk im brandenburgischen Feldheim adressiert das Teilsystem Strom. Das regionale Regelkraftwerk ist im September 2015 offiziell gestartet. Es ist mit einem Batteriespeicher ausgerüstet, der über eine Leistung von zehn Megawatt (MW) und einer Kapazität von zehn Megawattstunden (MWh) verfügt. Damit ist das Batteriekraftwerk das größte in Europa zu dem Zeitpunkt.

Die Weiterentwicklung eines hocheffizienten Batteriespeichers zum Regelkraftwerk bzw. zur Bereitstellung von Netzstabilisierungsleistungen stellt den Schwerpunkt des Verbundvorhabens „SDL-Batt“ dar. Hierbei sollen verschiedene Systemdienstleistungen untersucht, teilweise erprobt, dokumentiert und in ihrer Wirtschaftlichkeit miteinander verglichen werden. Die Erbringung von Regelleistung und weiteren Systemdienstleistungen sowie die hierfür notwendigen Entwicklungen und Erprobungen werden auf Basis eines innovativen 10-MW-Lithium-Ionen-Batteriesystems betrachtet.

### a. Beschreibung Regionales Regelkraftwerk Feldheim

#### Adressierte Probleme und Herausforderung

Eine Herausforderung der Energiewende ist es, bei volatiler Einspeisung die Netzleistungen zu stabilisieren. In diesem Zuge existiert ein großer Bedarf an der Möglichkeit, Energiemengen zeitlich (z. B. durch Lastmanagement oder Speicher) oder räumlich (über die Stromnetze) zu verschieben, um Schwankungen in Produktion und Nachfrage ausgleichen zu können. Das Projekt „SDL-Batt“ versucht einen Betrag zur Weiterentwicklung eines effizienten Batteriespeichers zu leisten.

#### Technischer Ansatz

Das Batteriekraftwerk Feldheim besteht aus vier Hauptkomponenten: dem 10-Megawatt-Energiespeicher, einem innovativen System für die Anbindung an das Netz, dem übergeordneten intelligenten Energiemanagement und der Schnittstelle zum Übertragungsnetz der 50Hertz Transmission GmbH. Der projektierte Speicherwirkungsgrad beträgt ca. >85% für das Gesamtsystem Batterie mit Wechselrichter.

Erstmals soll im Rahmen eines Verbundforschungsprojektes die reale Erbringung von Systemdienstleistungen mit Schwerpunkt Regelenergiebereitstellung untersucht und praktisch erprobt werden. Die Leistungsklasse 10 Megawatt war zu dem Entstehungszeitpunkt in Europa einmalig. Optimierungspotenziale im Bereich der projektspezifischen Untersuchungen werden in den Themenfeldern energetische Optimierung (Effizienz, Wirkungsgrad), wirtschaftliche Optimierung (Kosteneffizienz, Marktfähigkeit) sowie Dimensionierung und Auslegung des Systems im Hinblick auf Leistung und Kapazität für die unterschiedlichen Anwendungsfälle erforscht.

#### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Angesichts der steigenden Einspeisung von Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) sind Speicher für den Ausgleich von Erzeugung und Bedarf langfristig unerlässlich.

Die Erbringung von Systemdienstleistungen in konventionellen Kraftwerksblöcken führt zu einem „must-run“ dieser Anlagen (zudem hoher Mindestarbeitspunkt ohne weitere Absenkmöglichkeiten), wodurch sich bei hoher Einspeisung von Erneuerbaren Energien ein Systemkonflikt ergibt. Eine Reduzierung der Vollaststunden der konventionellen Kraftwerke ist die Folge. Hierfür sind nicht-konventionelle Erbringer von Systemdienstleistungen wie das installierte Batteriekraftwerk ein wesentlicher Lösungsansatz.

Durch die Funktionsweise auch als reines Systemdienstleistungs-Kraftwerk unabhängig von Wirkleistungseinspeisung trägt der 100-Prozent-Regelleistungsbetrieb des Batteriespeichers zu einem kosteneffizienten Systemumbau im Rahmen der Energiewende bei.

#### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Bei dem Projekt fielen ca. 12,8 Millionen Euro Investitonskosten an. Ein Anteil von fünf Millionen Euro kam aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und vom Land Brandenburg. Die Laufzeit ist auf 20 Jahre angelegt.

Mit dem Anwendungsfall Primärregelung ist die voraussichtlich lukrativste Anwendung des geplanten Batteriekraftwerkes bereits heute an der Schwelle zur Wirtschaftlichkeit gegeben. Der Regelenergiemarkt ist jedoch ein höchst volatiler Markt, so dass Prognosen sehr unsicher sind. Als Teilergebnisse des Projektes führen eine optimierte Auslegung in Verbindung mit Betriebserfahrungen und zukünftig höheren Stückzahlen zu einer Kostensenkung des Gesamtsystems. Der Betrieb ist zunächst für 10 Jahre geplant.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/schrumpfend/wachsend)**

Feldheim hat 128 Einwohner und ist Ortsteil von Treuenbrietzen. Lokalisiert im Landkreis Potsdam-Mittelmark, in dem die Bevölkerung bis 2030 nach Angaben der Bertelsmann-Stiftung um 4,2 % anwachsen wird.

**Innovationsgehalt/-kern**

Im Zentrum des Projektes steht die Erprobung des besonders leistungsstarken Energiespeichers. Feldheim ist das derzeit größte Batteriekraftwerk in der Europäischen Union.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

- Technik: Windanlagenbauer Enercon; Projektierer: Energiequelle GmbH
- Initiator: Energiequelle GmbH.
- Zielgruppen/Adressat: Deutscher Energiemarkt und Verbraucher

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Feldheim ist zum Zentrum einer ganzen Region geworden, indem die nachhaltige Transformation des Energiesystems auf der lokalen Ebene zum Ziel geworden ist. Regelmäßig werden Schulklassen und Interessenten-Gruppen durch das Kraftwerk geführt und so seine Pilotfunktion auch vermarktet.

### b. Bewertung Regionales Regelkraftwerk Feldheim

**Ressourcenleichtigkeit**

Mithilfe der Batterie wird eine Speichermöglichkeit für erneuerbaren Energien geschaffen, die bei späterer Nutzung der Energie den Bedarf an fossilen Brennstoffen reduziert, d. h. $CO_2$-/ THG- und Luftschadstoffemissionen werden verringert. Indirekt bewirkt die Möglichkeit der Speicherung eine potenzielle Verringerung des Netzausbaus.

Es ist zu beachten, dass Batterien selbst einen großen „ökologischen Fußabdruck“ besitzen. Der Ressourcenaufwand für den Bau ist hoch, sodass die Ressourcenleichtigkeit im Gesamtkontext betrachtet werden muss. Zusätzlich entsteht ein Bedarf am Aufbau einer neuen IKT Infrastruktur, die gleichsam Ressourcen benötigt. Energieverluste entstehen durch die notwendige Kühlung der Batterie, was auch nachteilig ist. Zu bedenken ist auch, dass die Lebenszeit von Batteriesystemen endlich ist und die Recycelfähigkeit eine große Rolle bei der Ressourcenleichtigkeit einnimmt.

**Demografiefestigkeit**

Die Technik ist demografiefest, da sie weder auf schwankende Einwohnerzahlen noch auf eine alternde Gesellschaft reagieren muss. Das System zielt, auch aufgrund seiner Beschränkung auf die Bereitstellung von Strom, nicht zwingend auf den lokalen Verbrauch ab und speist nach Preis/Nachfrage die Energie in das vorhandene Netz, auch überregional.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Grundsätzlich ist die Nutzung einer solchen Technik in allen Raumtypen möglich. Voraussetzung ist die Produktion von Überschussstrom und eine entsprechende Netzanbindung. In der Praxis sind die entsprechenden Flächen jedoch vor allem in ländlichen Regionen vorzufinden. Die räumliche Nähe zu einem direkten Verbraucher wie z. B. Siedlungsgebiet würde einen aufwändigen Netzausbau ersparen.

### Problembewältigungspotenzial

Die Speicherungstechnik weist ein hohes Problembewältigungspotenzial auf, da sie die Schwankungen zwischen Angebot und Nachfrage ausgleicht, die Netze stabilisiert und erneuerbare Energien effizienter verfügbar macht. Batteriespeicher haben den Vorteil gegenüber anderen Speichern, dass Strom als Strom gespeichert wird und nicht wie bei Power-to-Heat oder Power-to-Gas-Speichertechnologien mit entsprechenden Verlusten umgewandelt werden muss. So ist die Umwandlung von Strom in Wasserstoff und wieder zurück zu Strom jeweils mit Umwandlungsverlusten verbunden. Auch ist Strom als Energieform höherwertiger als Wärme. Bei Batteriespeichern[105] sind auch Energieverluste – zu berücksichtigen (siehe oben Abschnitt Ressourcenleichtigkeit).

### Innovationskraft

Die Umsetzung des Einsatzes einer Lithium-Ionen Batterie mit einer Speicherkapazität von 10 MW war in 2015 europaweit einmalig. Zudem erschließen sich hier für die Planung von höherer Energiedichte[106], die Trafohersteller und im Bereich der Klimatisierung (Kühlung) der Anlage neue technische wie institutionelle Handlungsfelder. Durch die Anbindung eines Forschungsvorhabens, bei dem die Speichertechnologie in lokale Konzepte integriert werden soll, verstärkt sich die Innovationskraft. Grundsätzlich ist die Abwägung zwischen Batteriekraftwerk oder Netzausbau eine strategische Entscheidung, an der sich auch die Innovationskraft letztlich bemessen muss (siehe auch oben). Generell spielt für Entscheider die konkrete Situation vor Ort (z. B. vorhandene Infrastruktur) eine große Rolle. Das Beispiel zeigt auf, dass der Aufbau leistungsfähiger Batteriesysteme möglich ist und ein wichtiger Bestandteil der Energiewende sein kann.

### Infrastruktureller Kontext

Das Kraftwerk selbst ist als dezentrale Energiequelle ausgerichtet und an ein entsprechendes überregionales Netz angeschlossen.

### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Die Energiespeicher haben aufgrund ihres Volumens einen Einfluss auf das Landschaftsbild. Hier ist dementsprechend prinzipiell Konfliktpotenzial zu erwarten. Dies gilt für Feldheim selbst nur eingeschränkt, da sich hier die Gemeinde geschlossen für den Weg einer umfassenden Energiewende entschlossen hat. Zudem wurde das Gebäude von Graffitikünstlern aus Potsdam künstlerisch gestaltet, womit auch kreative Lösungen für eine Erhöhung der Akzeptanz zu finden sind.

### Ökonomische Tragfähigkeit

Das Projekt wurde durch Fördermittel unterstützt und benötigt nicht unerhebliche Investitionskosten. Da auch in anderen Orten ähnliche Systeme installiert werden (z. B. von Wemag, STEAG, RWE), scheint die ökonomische Tragfähigkeit langfristig gegeben; Voraussetzung sind jedoch Standorte, an denen ein entsprechender Stromüberschuss produziert wird.

Beispielsweise nimmt die STEAG ohne die Bezuschussung durch Fördergelder den Bau von sechs Großbatteriesysteme mit je 15 MW Leistung in Angriff. Für diese, ebenso auf Lithium-Ionen Basis betriebenen, Speicher sollen insgesamt ca. 100 Mio. Euro investiert werden. Die erste Batterie dieser Art wurde in 2016 in Lünen (NRW) errichtet. Dies spricht nicht nur für eine ökonomische Tragfähigkeit, sondern dokumentiert ebenso die momentanen Marktveränderungen. Auch RWE errichtet in Herd-

105 Die Speicherung von Energie in Batterien ist auch mit Energieverlusten verbunden. So entstehen z. B. bei der Entladung Wärmeverluste (abhängig von der Geschwindigkeit). Auch die Außentemperatur ist relevant, da bei Kälte höhere Umwandlungsverluste entstehen. Die Faktoren haben Einfluss auf den Lade/Entlade-Wirkungsgrad der Technologie.

106 Der Systemwirkungsgrad liegt bei 85 %.

ecke für 6 Mio. Euro eine 6-MW Batterie auf Lithium-Ionen Basis, die 2017 in Betrieb gehen soll. Ein zukunftsträchtiger Markt ist absehbar.

**Link/Kontakt**

Prof. Dr. Joachim Krautz, BTU Cottbus, Lehrstuhl Kraftwerkstechnik,
Universitätsstraße 22, 03046 Cottbus
fon +49 355 69-4500,
e-mail krautz@tu-cottbus.de

René Just, Energiequelle GmbH
Hauptstr. 44, 15806 Zossen
e-mail just@energiequelle.de
http://www.energiequelle.de

50Hertz Transmission GmbH
Bastian Bohm
Eichenstraße 3A, 12435 Berlin
e-mail Bastian.Bohm@50hertz.com
http://www.50hertz.com

**Quellen**

Nicklas Netzel, Lokale Energieströme etablieren – am Beispiel des Regionalen RegelKraftWerks, Energiequelle GmbH, Vortrag auf AEE (1.03.2016).

http://forschung-energiespeicher.info/batterie-im-netz/projektliste/projekt-einzelansicht/104/Netzstabilisierung_mittels_Batteriekraftwerken/ (1.03.2016).

http://www.photovoltaik.eu/Archiv/Meldungsarchiv/Zehn-Megawattspeicher-in-Feldheim-startet,QUlEPTY3MTkxMyZNSUQ9MTEwOTQ5.html (1.03.2016).

http://www.mwe.brandenburg.de/sixcms/detail.php/bb1.c.372166.de (1.03.2016).

http://www.ingenieur.de/Themen/Energiespeicher/In-Feldheim-entsteht-Deutschlands-groesster-Batteriespeicher (10.04.2016).

## 2.2 BPB im Cluster Wasser

### 2.2.1 Abwärme aus Abwasser am Beispiel von IKEA in Berlin

In diesem Best Practice Beispiel werden die Teilsysteme Abwasser und Wärme adressiert. Abwasser ist eine stoffliche wie auch energetische Ressource. Das Beispiel zeigt, wie die Wärme des kommunalen Abwassers zum Beheizen und Kühlen eines IKEA-Filialgebäudes genutzt wird. Dafür wurde eine 200 Meter lange Abwasserdruckleitung gebaut, die an das kommunale Abwassernetz angeschlossen wurden.

#### a. Beschreibung Abwärmenutzung IKEA Berlin

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Der Wärmebedarf von Wohngebäuden, Büroimmobilien und Industriebetrieben ist enorm. Der Energieeinsatz für die Produktion von Wärme ist in Deutschland um ein vielfaches höher als der Einsatz zur Produktion von Strom. Etwa die Hälfte der Energie wird benötigt, um Gebäude zu beheizen und die Industrie mit der notwendigen Prozesswärme zu versorgen. Bisher wird dem Sektor der Wärmeversorgung bei der deutschen Energiewende zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt, obwohl hier große Einsparpotenziale vorliegen, die bisher nicht genutzt werden. So etwa die Nutzung von Abwärme des Abwassers für Wärme und Kühlung. Die Anlage von IKEA reduziert den $CO_2$-Ausstoß im Vergleich zu

fossil betriebenen Erdöl- oder Erdgasheizungen um bis zu 60 % und leistet somit einen Beitrag zum Klimaschutz.

**Technischer Ansatz**

Generell ist die Abwärme aus Abwasser gut für energetische Zwecke zu nutzen. Zu Nutze gemacht wird, dass warmes Dusch-, Bade- und Spülwasser (Grauwasser) das Abwasser in der Kanalisation auf durchschnittlich 15 Grad Celsius erwärmt. Diese Wärme kann energetisch genutzt werden. Mittels Wärmetauscher wird dem Abwasser Wärmeenergie entzogen, wodurch sich das Abwasser abkühlt. Eine Wärmepumpe kann dadurch eine Nutztemperatur von rund 50 Grad Celsius erzeugen. Somit werden aus 1.000 Litern Abwasser bei einer Abkühlung von zwei Grad rund zwei Kilowattstunden Heizenergie erzeugt. Im Sommer kann das System zum Kühlen genutzt werden. Jedoch sind einige Voraussetzungen zu erfüllen. Zum Beispiel besteht ein technischer Vorteil bei der Nutzung eines Wärmetauschers im Druckrohr, da das Rohr die ganze Zeit voll befüllt ist. Des Weiteren dürfen Wärmeüberträger den hydraulischen Ablauf nicht durch Einengungen beeinflussen, die abwasserseitigen Druckverluste müssen moderat sein. In räumlicher Nähe zum Wärmetauscher im Kanal muss entsprechender Abnehmer (Senke) für die Wärme liegen.

In 2010 wurde mit 34.000 $m^2$ die IKEA-Filiale in Lichtenberg eröffnet, ein Großteil der Heizenergie wird aus dem kommunalen Abwasser gewonnen. Insgesamt wurde von IKEA das Programm „IKEA goes renewable“ erarbeitet, mit dem komplett auf fossile Brennstoffe verzichtet werden soll. In Lichtenberg wurde ein Konzept mit mehreren Bestandteilen umgesetzt: Abwärme, Lüftungsanlage, Wärmetauscher, Regenwassernutzung, Strom aus PV-Anlage und Warmwasser per Solarthermie sowie Elektromobilität.

Im Winter wird mit Hilfe von Wärmepumpen dem Abwasser aus der Kanalisation Wärme entzogen und für die Gebäudebeheizung (per Fußbodenheizung sowie Deckenstrahlplatten) auf rund 35 Grad Celsius erwärmt. Angezapft wird eine Abwasserdruckleitung (ADL), die von einem Doppelmantelwärmetauscher umschlossen ist. Das Verbindungsrohr ist ca. 200 m lang und hat einen Kernumfang von 700 nach DN (Innen), die Fließgeschwindigkeit liegt bei 1m/s. Die maximale Auskühlung des Abwassers liegt bei 1,6 K. Am IKEA Standort liegt ein ganzjähriger Förderstrom von ca. 500$m^3$/h bis ca. 1.400 $m^3$/h vor. Über Wärmepumpe/ADL Verteiler wird die Wärme zu einem Wärmeverteiler (Lüftung und Fußboden) weitergeleitet. Für Spitzenlasten steht ein Heizkessel zur Verfügung. Im Sommer wird zur Kühlung die Wärme des Einrichtungshauses wiederum ins Abwasser geleitet. Mit dieser Art der Energienutzung kann der Jahresenergiebedarf im Sommer zu 100 Prozent und im Winter bis zu 70 Prozent abgedeckt werden. Unterstützend fungieren eine Lüftungsanlage und eine Wärme- und Kälterückgewinnungsanlage.

Auf dem Dach des Einrichtungshauses sorgen Solarkollektoren mit einer Gesamtfläche von rund 50 $m^2$ im Sommer und in den Übergangsjahreszeiten für die Erwärmung des Trinkwarmwassers.[107]

Weiterhin wird über eine unterirdische Zisterne das Regenwasser, welches auf einem Teil des Daches aufgefangen wird, gespeichert und als Toilettenspülwasser genutzt. Zusätzlich soll das Dach des Gebäudes zukünftig durch eine 4.000$m^2$ große PV-Anlage genutzt werden.

Neben der Nutzung von Abwärme des Abwassers spielt die Elektromobilität am Lichtenberger Standort eine Rolle: Auf dem IKEA Parkplatz gibt es eine Elektrotankstelle, die für alle öffentlich zugänglich

107 Zur Erzeugung von Warmwasser für Küche und Sozialbereiche wird auf dem Dach eine thermische Solaranlage mit einer Gesamtfläche von ca. 50 $m^2$ installiert. Die erzeugte Wärme wird in Pufferspeichern mit einem Inhalt von 2 x 2000 Litern gespeichert und für die Vorerwärmung des Warmwassers genutzt. Die Solaranlage übernimmt in den Sommermonaten und in der Übergangszeit zum überwiegenden Teil die Trinkwassererwärmung. Zusätzlich wird die Abwärme des Kältekreislaufs der Kühlzellen zur Trinkwassererwärmung genutzt.

ist. Außerdem hat das Einrichtungshaus zwei Hybridfahrzeuge – das eine können Kunden als Mietwagen leihen, das andere ist ein Firmenwagen.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Ziel war es, eine möglichst kostensparende und nachhaltige Anlage zu errichten.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

IKEA investierte in sein neues „Energiesparhaus" rund 70 Mio. Euro. Die Amortisationszeit wird mit 7 Jahren angegeben.

Nach Angaben der Studie „Potentiale und technische Optimierung der Abwasserwärmenutzung" aus dem Jahr 2013 sind die Wärmegestehungskosten einer Abwasserwärmenutzungsanlage im Vergleich zu konventionellen Erdöl- oder Erdgasheizungen konkurrenzfähig, da die Abwasserwärmenutzung mit Gestehungskosten in Höhe von 7 bis 11 Cent/kWh im konkurrenzfähigen Bereich liegt. Es kann auch davon ausgegangen werden, dass mit zunehmender Verbreitung der Abwasserwärmenutzung die Investitionskosten für diese Technologie noch sinken werden und damit die Attraktivität steigen wird.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)**

Urban, wachsend/stabil

**Innovationsgehalt/-kern**

Nutzung von Abwärme für Wärme und Kühlung. Zu nennen sind auch die technischen Innovationen wie Wärmetauscher oder die drei Groß-Wärmepumpen.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

IKEA Deutschland GmbH & Co.KG. Enge Kooperation mit den Berliner Wasserbetrieben.

- Initiator: IKEA Deutschland GmbH & Co.KG
- Zielgruppen/Adressat: IKEA Deutschland GmbH & Co.KG; Kunden

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Nach Angaben von IKEA wird jedes Jahr bis zu 1.020 Tonnen Kohlendioxid-Emissionen gegenüber herkömmlichen Installationen (z. B. Lüftungsanlagen) gespart. Zudem soll die Photovoltaikanlage jährlich 570.000 Kilowattstunden Strom produzieren und dadurch 500 Tonnen $CO_2$ einsparen.

### b. Bewertung Abwärmenutzung IKEA Berlin

**Ressourcenleichtigkeit**

Das Projekt ist ein Beispiel für ressourcenleichte Wärmegewinnung, da es die Nutzung von vorhandener Infrastruktur zur Grundlage wählt. Zur Gewinnung der Wärmeenergie werden lediglich Abwässer genutzt, also auch keine Energieträger verbraucht. Hierzu war ein Neubau von 200 m Kanalsystem zum Anschluss an das Einrichtungshaus notwendig. Der Jahresenergiebedarf wird im Sommer zu 100% und im Winter zu 70 % abgedeckt. Dies substituiert eine Wärmegewinnung aus fossilen Primärenergieträgern und reduziert auf diese Weise $CO_2$- und Luftschadstoff-Emissionen.

**Demografiefestigkeit**

Die Nutzung von Abwärme aus der Kanalinfrastruktur ist abhängig von dem Eintrag von Abwasser. In einigen Regionen haben sich durch Sparmaßnahmen z. B. beim Brauchwasser die Abwassereinträge

ins Kanalsystem reduziert. Bei einer Schrumpfung der angeschlossenen Bevölkerung kommt es zu reduzierten Abwassermengen, die eine solche Anlage nicht mehr auslasten könnten (hier ausgelegt auf mind. 500m³/h). Nach Angaben der Bertelsmann-Stiftung wird in Berlin ein Bevölkerungswachstum bis 2030 von über 10 % erwartet, weshalb an dem Standort nicht davon ausgegangen werden kann. Zudem kann bei einer Amortisationszeit von 7 Jahren die Infrastruktur bereits nach wenigen Jahren angepasst bzw. abgebaut werden. So ist aus wirtschaftlicher und technischer Sicht die nötige Flexibilität zu erwarten.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Eine Abhängigkeit von vorhandener Infrastruktur in Form eines bedarfsgerechten Abwassersystems besteht. Daher eignet sich die Technologie generell für Regionen im urbanen bzw. suburbanen Raum. Grundsätzlich ist die Technologie jedoch auf jedes Kanalnetz, welches die Voraussetzungen erfüllt, übertragbar und dies unabhängig von der räumlichen Siedlungsstruktur. Voraussetzung sind Auslegungen mit entsprechenden Abwasservolumina und Temperaturen.

**Problembewältigungspotenzial**

Die Wärmewende gehört zu den großen gesellschaftlichen Herausforderungen. Für die Umsetzung der Wärmewende sollten die vorhandenen Potenziale genutzt werden, weshalb diese Sektorkopplung ein gelungenes Beispiel ist. Der Beitrag der Abwärme aus Abwasser wurde in einer Studie für NRW berechnet[108], wonach das Potenzial in NRW bei 500–2.000 MW Heizleistung liegt, wobei sich die Betrachtung auf vor und nach der Kläranlage (aller Größen) bezieht und bivalent alternativ arbeitenden Anlagen berücksichtigt. Nach Angaben des Ratgebers „Heizen und Kühlen aus Abwasser“[109] von 2010 könnten in der Schweiz 300.000 Häuser mit der Energie aus Abwasser geheizt werden. Berlin verfügt beispielsweise über eine Kanalinfrastruktur mit 1.170 km Druckrohrleitungen, mit denen den städtischen Klärwerken Abwasser zugeleitet wird.

Wärmetauscher können in das bestehende öffentliche Kanalnetz nachträglich eingebaut, oder aber auch bei Neuentwicklung eines Netzes berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann Wärme aus Abwasser auch direkt im Haus bzw. Block gewonnen werden; dann selbstverständlich in kleineren Dimensionierungen. Mit der Abwärme aus Abwasser kann nicht die Wärmewende (u.a. Umstellung auf EE im Sektor Wärmeversorgung) gänzlich gelöst werden, sie kann jedoch einen Beitrag leisten die Herausforderung des Wärmemarktes anzugehen.

**Innovationskraft**

Das technische Innovationspotenzial ist nicht hoch, da die Technologien, wie Wärmepumpen etc. seit vielen Jahren erprobt sind. Jedoch ist die Nutzung dieser Energie innovativ, da ihr bisher wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Dadurch, dass nicht umfassend neue Infrastrukturen aufgebaut werden müssen, sind Anpassungsspielräume begrenzt. Da jedoch bestehende Infrastrukturen genutzt werden können, ist das Einsparpotenzial dafür umso größer.

**Infrastruktureller Kontext**

Die Anlage selbst ist dezentral ausgerichtet, die Anbindung an ein zentrales Netz jedoch unablässig.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Hürden bei der sozialen Akzeptanz sind nicht auszumachen. Die Anlagen sind nicht sichtbar, die Systemsteuerung ändert sich nicht und die Preise werden eher günstiger.

---

108 MKULNV NRW: Potentiale und technische Optimierung der Abwasserwärmenutzung, 2013.

109 EnergieSchweiz: Heizen und Kühlen mit Abwasser- Ratgeber für Bauherrschaften und Gemeinden, Bern 2007.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Eine ökonomische Tragfähigkeit scheint bei ähnlichen Voraussetzungen gegeben. Die Durchführung hier durch ein privatwirtschaftliches Unternehmen, das die Investitionskosten ohne Zuschüsse stemmt, bezeugt dies. Die Amortisationszeit soll bei 7 Jahren liegen.

**Link/Kontakt**

Simone Settergren (Pressereferentin)
IKEA Deutschland GmbH & Co. KG
fon (06122) 585 6173
fax (06122) 585 4121
e-mail simone.settergren@ikea.com

**Quellen**

http://www.ikea.com/ms/de_DE/about_ikea/newsroom/press_releases/BerlinLichtenbergUmwelt.pdf (1.03.2016).

http://www.bwb.de/content/language1/html/7660.php (1.03.2016).

http://www.waerme-aus-abwasser.de/index.php?ID=103&action=article&articles_ID=15& (1.03.2016).

### 2.2.2 Fernkälte aus Grundwasserüberleitung für Rechenzentrum in München

Das Projekt adressiert die Teilsysteme Wasser, Strom und Kreislaufwirtschaft. Gemeinsam mit der BMW Group haben die Stadtwerke München eine innovative, ressourcenschonende Energieversorgung entwickelt: die Nutzung von kaltem Grundwasser aus U-Bahn-Dükern als Kühlmittel für das Forschungs- und Innovationszentrum (FIZ) der BMW Group. Die Inbetriebnahme erfolgte bereits 2004. Eine Anlagenoptimierungen erfolgte 2005/2006.

#### a. Beschreibung Fernkälte Rechenzentrum München

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Nicht nur bei der Wärmeerzeugung, auch bei der Kühlung wird Energie eingesetzt. Besonders im industriellen Sektor besteht Kühlungsbedarf. Um Energie einzusparen, sollten umfassende und flexible Systeme auch zur Verwertbarkeit von Kälte entwickelt werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Klimaanlagen lässt sich durch Fernkälte etwa die Hälfte des Primärenergieaufwands sparen, wodurch $CO_2$-/THG-- und Luftschadstoff-Emissionen reduziert werden.

**Technischer Ansatz**

Aus acht Dükern im Bereich der U-Bahnhöfe Feldmoching, Hasenbergl und Dülferstraße sowie aus je zwei in konventioneller Bauweise errichtenden Brunnenanlagen wird das etwa 11 bis 13 Grad kalte Grundwasser entnommen und über eine circa 4,6 Kilometer lange Rohrleitung in das BMW FIZ transportiert. Im FIZ wird dann anstelle einer konventionellen Klimaanlage die Kälte des Düker-Grundwassers zur Verfügung gestellt. Nach dem „Kühleinsatz“ wird das auf etwa 17 Grad erwärmte Wasser wieder in die Düker und somit in den Grundwasserkreislauf zurückgespeist.

Die innovative Leistung besteht darin, dass der erneuerbare Energieträger, Grundwasser aus den Dükern der Münchner U-Bahn zur Kälteerzeugung verwendet wird. Damit wird eine aus dem Naturverbund entnommene Primärenergie ohne Umwandlung zur Endenergie. Elektrischer Strom wird lediglich zur Förderung und für den Transport des Kältemittels Grundwasser benötigt. Die Erwärmung des Grundwassers wird dabei auf ein umweltverträgliches Maß begrenzt und der Grundwasserspiegel an der U-Bahn-Röhre stabilisiert.

### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Ziel ist es eine möglichst emissionssparende Lösung zur Kühlung eines Rechenzentrums zu entwickeln.

### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Die Gesamtkosten für die geförderte 4 MW-Anlage betragen rund 5,6 Mio. € und für die 5 MW-Anlage annähernd 6,51 Mio. €. Die Amortisationszeit beläuft sich auf 12 Jahre.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat dieses Pilotprojekt der 4 MW-Anlage (entspricht Bauabschnitt 1) im Rahmen eines Demonstrationsvorhabens mit einem zinsverbilligten Darlehen in Höhe von rund 2,99 Mio. € gefördert. Das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie hat die im Endausbau (ab 01.01.2006) erreichte 5 MW-Anlage (entspricht Bauabschnitt 1+2) mit einem Investitionszuschuss in Höhe von 300.000 € gefördert. Ein Betrag von 2.31 Mio. € für die 4 MW-Anlage bzw. 3.22 Mio. € für die 5 MW-Anlage wurde von den Stadtwerken München bereitgestellt.

Ausgehend von einer Wassergewinnung und -förderung von rund 195 l/s ergibt das Investitionskosten von circa 1.200 € pro laufenden Meter Fernkälteleitung inkl. aller Kosten. So entstehen rein rechnerisch einmalige Investitionskosten ohne Unterhalt für die Bereitstellung von 1 kW Kälteleistung von 1.300 € bis 1.400 €.

### Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)

Die notwendige Infrastruktur ist vor allem in urbanen Siedlungsstrukturen zu finden. Die Technologie ist in wachsenden und schrumpfenden Regionen prinzipiell einsetzbar, die Umsetzung ist jedoch in wachsenden Regionen wahrscheinlicher.

### Innovationsgehalt/-kern

Im Zentrum der Anlage steht die Nutzung von kaltem Grundwasser aus U-Bahn-Dükern und Brunnen als Kühlmittel für das Forschungs- und Innovationszentrum, um Wege zu einer ressourcenschonenden Energie-versorgung aufzuzeigen.

### Governance/Steuerungsebene und Akteure

BMW Group und Stadtwerke München

- Initiator: BMW Group und Stadtwerke München
- Zielgruppen/Adressat: BMW Group und Stadtwerke München

### Erzielte Ergebnisse, Erfolge

Im Vergleich zu herkömmlichen Klimaanlagen verursacht Fernkälte weniger $CO_2$-Emissionen und etwa die Hälfte des Primärenergieaufwands lässt sich sparen. Im Gegensatz zur konventionellen Kälteerzeugung mittels Kompressionskältemaschinen spart die Fernkälte jährlich rund 10 Millionen Kilowattstunden Strom ein. Das entspricht dem Jahresstromverbrauch von rund 3.000 Münchner Haushalten.

Durch dieses Projekt vermeidet die BMW Group jährlich $CO_2$-Emissionen im Umfang von 4.500 Tonnen. Außerdem werden rund sieben Millionen Kilowattstunden Strom im Vergleich zur herkömmlichen Kälteerzeugung eingespart.

Für dieses Projekt wurden die Stadtwerke München und die BMW Group mit dem Bayerischen Energiepreis 2006 ausgezeichnet.

### b. Bewertung Fernkälte Rechenzentrum München

#### Ressourcenleichtigkeit

In diesem Projekt werden teils vorhandene Infrastrukturen genutzt, teils müssen neue installiert werden (Fernkältenetz). Die Kühlung mittels des Grundwassers reduziert den Bedarf an fossilen Energieträgern und verringert auf diese Weise $CO_2$- und Luftschadstoff-Emissionen.

#### Demografiefestigkeit

Das aufgeführte System ist netzgebunden, wobei u.a. Brunnenanlagen und Rohrleitungen zu nennen sind. Aus diesem Grund ist das System nur bedingt demografiefest. Bei Reduzierung des Kältebedarfs kann die Infrastruktur nicht einfach angepasst werden. Bei dem System muss die Nachfrage gesichert sein, etwa durch Großbetriebe, die jedoch auch in Regionen mit abnehmenden Bevölkerungszahlen zu finden sind. Weniger die Demografie als solche, sondern die Entwicklung von Wirtschaftsstandorten ist somit das aus-schlaggebende Kriterium.

Bei Wachstum kann durch einer Gebäudeerweiterung bzw. Ergänzung die Infrastruktur angepasst werden. Das konkrete Beispiel ist als demografiefest einzustufen. Notwendig ist vorliegende Infrastruktur, die eher an den räumlichen Kontext gebunden ist, und dem Vorhandensein von Großabnehmern.

#### Räumliche Übertragbarkeit

Die räumliche Übertragbarkeit ist eingeschränkt, da in München für die Technologie günstige Voraussetzungen vorliegen, wie ein geringer Flurabstand des Grundwasserspiegels des oberen Grundwasserstockwerkes. Inwieweit diese Voraussetzungen in anderen Kommunen vorliegen, muss individuell geprüft werden.

Das Projekt adressiert größere Kommunen. Zwar sind auch in ländlichen Regionen größere Abnehmer zu finden, jedoch ist die notwendige vorhandene Infrastruktur an einen urbanen Siedlungskontext gebunden. Ein Neuaufbau ist keine Option, da das Projekt auf die Nutzung bislang nicht beachteter Synergieeffekte ausgerichtet ist. Im urbanen Raum ist es speziell für solche Teilräume geeignet, die einen hohen Kältebedarf haben (Industrie, Dienstleistungen) und die zugleich über geeignete Grundwasserleiter (Kältequelle) verfügen.

Die Technologie ist geeignet in stabilen bis wachsenden Regionen, in denen die Nachfrage gesichert ist, um Rentabilität, sowohl ökonomisch wie ökologisch, zu gewährleisten.

#### Problembewältigungspotenzial

Das Fernkälteprojekt ist ein Beispiel für die energiesparende Deckung des steigenden Bedarfs nach Kälte für Büros oder Rechenzentren. Der Kältebedarf steigt derartig stark an, dass er in den kommenden zwanzig Jahren das Niveau des Wärmebedarfs erreichen könnte. Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist gerade im Sommer mit einem weiteren Anstieg des Bedarfs zu rechnen.

Die Technik ist energieeinsparend und leistet einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung von Fernkältelösungen.

Ein Blick nach Wien zeigt das Potenzial an. Dort werden bereits zentrale Gebäude der Stadt mit Fernkälte versorgt, zum Beispiel der Wiener Hauptbahnhof. Fernkälte wird genutzt aus einer Kältezentrale mit den Kältemaschinen unterhalb des Gleiskörpers, aus Kühltürmen zur Rückkühlung im Schweizergarten und aus dem Fernkältenetz. In der Kältezentrale Hauptbahnhof werden neben sehr effizienten elektrischen Kältemaschinen auch Absorptionskältemaschinen eingesetzt, die Wärmeenergie aus der Müllverbrennung in Kälteenergie umwandeln. Diese Anlage vermag es 400.000m² zu klimatisieren (20

MW). Eine Ausweitung auf 25 MW und 500.000m² ist geplant. Wenngleich dies einen Aufbau neuer Netzinfrastruktur bedeutet, sind die Energieersparnisse hoch.[110]

### Innovationskraft

Die Idee der Fernkältenutzung ist nicht neu. Jedoch kann die fallspezifische Umsetzung hier als innovativ bezeichnet werden. Innovativ ist die Nutzung von Grundwasser zur Produktion von Fernkälte. Insbesondere die Zusammenarbeit der Stadtwerke mit regionalbedeutsamen Großunternehmen kann in institutioneller Hinsicht Vorbildcharakter entfalten. Dabei wohnt dem Projekt eine innovative Kraft inne.

### Infrastruktureller Kontext

Die Lösung beschränkt sich auf einen dezentralen bzw. semizentralen Infrastrukturkontext, kann im weitesten Sinne auf vorhandene Infrastrukturen angewiesen sein. Auch der Neubau von Infrastruktur ist möglich. In Wien existieren zudem auch zentrale Lösungen, bei denen mehrere Abnehmer von einer Quelle über ein Netz gespeist werden.

### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Die entsprechende Infrastruktur war in diesem BPB bereits vorhanden. Die Anlagen sind selbst bei Ausbau und Erweiterung nicht sichtbar für den Bürger. Es sind somit keine Hemmnisse auszumachen. Die Kosten sind von den entsprechenden Großunternehmen zu tragen.

### Ökonomische Tragfähigkeit

Die ökomische Tragfähigkeit scheint gegeben. Trotz hoher Investitionskosten soll sich die Maßnahme nach 12 Jahren amortisiert haben. Dass es von einem privatwirtschaftlichen Unternehmen ohne zusätzliche Fördergelder durchgeführt wurde, bestätigt die ökonomische Tragfähigkeit solcher Projekte.

### Link/Kontakt

SWM Versorgungs GmbH
Emmy-Noether-Straße 2, 80992 München
Herr Jürgen Hering
fon 089/23 61-45 53
fax 089/23 61-70 45 53
e-mail hering.juergen@swm.de

Michael Arnold, Netzstrategie
fon 0 89/23 61-22 71
fax 0 89/23 61-28 15
e-mail arnold.michael@swm.de

### Quellen

https://www.swm.de/geschaeftskunden/m-fernkaelte/bmw.html (10.04.2016)

https://www.swm.de/dam/jcr:7ef2e309-0c10-4b26-b011-0c5e881a2ba2/abschlussbericht-fernkaelte-dt.pdf (10.04.2016).

110 http://www.wienenergie.at/eportal3/ep/channelView.do/pageTypeId/67831/channelId/-48288 (zuletzt abgerufen am 10.06.2016)

### 2.2.3 Ökologisches Bauen mit Komposttoiletten und Pflanzenkläranlage in Schöneiche

Als Bauherrengesellschaft setzte sich die „Interessensgemeinschaft Landhof GbR“ das Ziel, Wohnraum für 13 Familien zu schaffen unter besonderer Berücksichtigung ökologischer und sozialer Kriterien. Die Einfamilienhaussiedlung wurde Ende 1996 in der Kommune Schöneiche schließlich verwirklicht. Als ein wichtiger Baustein des Projektes wurde jedes der Einfamilienhäuser mit einer Komposttoilette ausgerüstet. Für die gesamte Siedlung wurde zwecks Widerauffbereitung des Grauwassers eine zentrale Pflanzenkläranlage gebaut.

Dieses BPB ist allgemein eine Alternative vor allem in ländlichen Räumen, wenn sich ein Anschluss an zentrale Systeme ökonomisch und ökologisch nicht lohnt.

#### a. Beschreibung Komposttoiletten und Pflanzenkläranlage Schöneiche

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Wie oben erwähnt, ist es in dispers bzw. dünn besiedelten Gebieten häufig weder ökologisch noch ökonomisch Gebäude an Abwasserinfrastruktursysteme anzuschließen. Vor diesem Hintergrund müssen nachhaltige Konzepte für Abwasserinfrastruktur für solche Raumstrukturen entwickelt werden, die diese Voraussetzungen reflektieren.

Komposttoiletten adressieren mehrere Problemlagen zugleich. Zum einen sind sie eine alternative Lösung zur Fäkalienentsorgung in Regionen, die über keinen Anschluss an ein zentrales Abwassersystem verfügen. Auf diese Weise wird ein Ausbau von Infrastruktur vermieden. Zum anderen wandeln Komposttoiletten die Fäkalien in Humuserde um, und können als Düngemitteln verwendet werden.

Auch durch die Einrichtung von Pflanzenkläranlagen wird ein Ausbau von Abwasserinfrastrukturen in Regionen, die über keinen Anschluss an ein zentrales Abwassersystem verfügen, überflüssig. Zudem wird das Grauwasser auf umweltschonende Weise aufbereitet und kann im Anschluss wiederverwertet werden. Es wird demnach die Ressource Wasser eingespart. Pflanzenkläranlagen sind für ländliche Räume mit Schrumpfung geeignet. Sie sind keine Konkurrenz für konventionelle Abwasserentsorgung sondern bieten für bestimmte Rahmenbedingungen eine Alternative.

**Technischer Ansatz**

Bei Komposttoiletten werden die Fäkalien in einem Behälter gesammelt, in welchem Rindenmulch den Geruch bindet sowie die Kompostierung beschleunigt.

Pflanzenkläranlagen reinigen anfallendes Grauwasser üblicherweise in zwei Stufen – einer mechanischen und einer biologischen. Als mechanisches Verfahren bezeichnet man die Lenkung des Wassers durch mehrere Kammern, in denen sich die Feststoffe absetzen können bzw. bereits erste anaerobe biologische Abbauprozesse ablaufen. Häufig wird hier ein zusätzlicher Filter eingebaut, um die natürliche Filterung zu unterstützen.

In einem zweiten Schritt wird das Wasser in ein Schilfbeet geleitet, dessen Grund mit Kies ausgelegt ist. Wird das Wasser durch den Kies geleitet, bindet dieser Phosphate. Durch das Schilf bedingte Mikroorganismen, die sich im Kies absetzen, werden Kohlenstoff und Stickstoff abgebaut.

Die Kombination aus Komposttoilette und Pflanzenkläranlage ist zudem sinnvoll, da durch die Nutzung von Komposttoiletten der Anteil an Feststoffen im Abwasser reduziert wird und so die Pflanzenkläranlage entlastet.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Ziel des Projektes war es unter Berücksichtigung ökologischer und sozialer Kriterien attraktiven Wohnraum für 13 Familien zu schaffen und so eine ökologische Orientierung des Ortes zu befördern.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

-

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)**

ländlich

**Innovationsgehalt/-kern**

Beiden Maßnahmen ist gemein, dass sie Teil eines integrierten Wassermanagements sind. Es wird auf allen Ebenen Wasser eingespart sowie eine umweltschonende Recycling-Idee verwirklicht.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Interessensgemeinschaft Landhof GbR

- Initiator: Interessensgemeinschaft Landhof GbR
- Zielgruppen/Adressat: Mitglieder der Interessensgemeinschaft; Stadt Schöneiche

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Der Bau der Siedlung wurde erfolgreich verwirklicht und sie ist voll bewohnt. Zudem trugen die positiven Erfahrungen des Projektes dazu bei, auch der übrigen Bevölkerung der Kommune Schöneiche Umweltbewusstsein und ökologische Bauweise näher zu bringen.

### b. Bewertung Komposttoiletten und Pflanzenkläranlage Schöneiche

**Ressourcenleichtigkeit**

Sowohl durch den Bau einer Pflanzenkläranlage wie auch durch die Nutzung von Komposttoiletten wird ein Aus- bzw. Aufbau von Infrastrukturen vermieden. Die beiden Lösungen sparen zudem Wasser in erheblichem Maße ein. Sie sind also in doppelter Hinsicht ressourcenleicht.

Durch den Einsatz der Pflanzenkläranlage wird eine chemische Behandlung des Wassers zur Reinigung vermieden und somit eine umweltschonende Alternative zu herkömmlichen Kläranlagen geboten. Die Fäkalien werden als Bestandteil kompostierter Humuserde weiterverwertet. Zentrale Kläranlagen sind große Energiekonsumenten. Diese Energie wird mit diesem BPB eingespart.

**Demografiefestigkeit**

Die aufgeführten Systeme sind nicht netzgebunden, was für eine Demografiefestigkeit spricht. Generell zeichnen sich Wasser/Abwasserinfrastrukturen durch lange Nutzungsdauern aus – die hier präsentierte Lösung ist in schrumpfenden ländlichen Räumen hingegen flexibel und ist somit demografiefester, als herkömmliche Abwasserinfrastrukturen. Die de- und semizentralen Lösungen lassen sich kleinräumlich flexibel an veränderte Bedarfe anpassen.

Die im Gebäude installierte Infrastruktur kann bei einer geringeren Bewohneranzahl zunächst ohne Anpassungen weiter betrieben werden. Für die Aufbereitung von Grauwasser könnte eine geringere Anzahl an Behältern genutzt werden, würde also keinen großen Aufwand bedeuten.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Die Realisierung findet vor allem in Neubauvorhaben wie in Schöneeiche bei Berlin statt, kann im Bestand jedoch ebenso umgesetzt werden (z. B. Gartenhäuser, Kleingärten).

**Problembewältigungspotenzial**

Das Abwasserkonzept leistet einen Beitrag zur Erhöhung der Effizienz der Wasserkreisläufe auf umweltschonendem Wege. Es ist vor allem für den ländlichen Raum.

**Innovationskraft**

Das Projekt entfaltet seine Innovationskraft weniger im technischen Bereich, sondern vor allem in sozialer Hinsicht. Die Technik hinsichtlich der Toiletten wie der Kläranlage ist einfach und schon lange bekannt. Die flächenmäßige Umsetzung für ein ganzes Neubaugebiet jedoch steht für einen bewussteren Umganges mit der Ressource Wasser im Allgemeinen. Die Pflanzenkläranlage bedarf eines entsprechenden Durchlaufes, sodass die Nutzung durch mehrere Haushalte gesichert sein muss.

**Infrastruktureller Kontext**

Der infrastrukturelle Kontext ist mit Blick auf die Komposttoiletten dezentral. Die Pflanzenkläranlage ist semizentral, da kleinräumig die entsprechenden Parteien mit der Anlage vernetzt sind.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Die Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz ist problematisch. Denn die Nutzung der Komposttoiletten erfordert eine Umstellung der Nutzer. Prinzipiell gilt jedoch, dass wenn die Anlagen reibungslos laufen, und sich keine Komfortunterschiede zu konventionellen Systemen zeigen, die Nutzer de facto nur gering beeinträchtigt würde. Eine regelmäßige Entleerung der Behälter ist nötig.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Dieses Projekt wurde mit Fördermitteln unterstützt. Eine ökonomische Tragfähigkeit scheint jedoch gegeben. Die Investitionskosten sind gering und auf mehrere Parteien umlegbar. Im Vergleich zu zentralen Systemen erweisen sie sich als kostengünstig. Hinzu kommen geringe Betriebskosten.

**Link/Kontakt**

Verwaltung der Gemeinde Schöneiche
Dorfaue 1, 15566 Schöneiche bei Berlin
fon 030–64 33 04–0
e-mail info@schoeneiche-bei-berlin.de

**Quellen**

http://www.oekosiedlungen.de/schoeneiche/ (10.03.2016).

Deutsche Bundesstiftung Umwelt und Deutsches Institut für Urbanistik (1997): TAT-Orte. Die Gemeinden im ökologischen Wettbewerb, Berlin.

### 2.2.4 Kleinkläranlagen entlasten kommunale Haushalte – Beispiel „Dahler Feld“

Das Projekt Kleinkläranlagen in Selm adressiert die Teilsysteme Wasser und Abwasser. Für die Stadt Selm (Kreis Unna) hätte es hohe Kosten verursacht, den Abwasseranschluss von 25 abgelegenen Häusern im Dahler Feld, einem Außengebiet, zu gewährleisten. Eine Alternative gelang dank eines neuen vom Fraunhofer ISI mit Unterstützung der West-LB entwickelten Geschäftsmodells für Abwasserbetriebe. Es sieht vor, dass die modernen, aber in der Anschaffung teureren dezentralen Membrankleinkläranlagen zunächst von einem Unternehmen – in diesem Fall vom Lippeverband – gekauft, eingebaut und betrieben werden und nach zehn Jahren in den Besitz der Hauseigentümer übergehen. Im Rahmen des Pilotprojekts AKWA im Dahler Feld wurde der Betrieb der Kleinkläranlagen hinsichtlich ihrer technischen und wirtschaftlichen Eignung auf diese Weise in einer zweijährigen Begleitfor-

schungsphase erprobt. Die Form des Contracting-Betriebs der Kläranlagen stellt die Abwasserentsorgung im ländlichen Raum auf eine professionelle Basis.

### a. Beschreibung Kleinkläranlagen „Dahler Feld“

#### Adressierte Probleme und Herausforderung

Eine Herausforderung der Wasserwirtschaft ist, sowohl in technologischer als auch in organisatorischer und ökonomischer Hinsicht nachhaltige Konzepte für die Wasserinfrastruktur von dispers bzw. dünn besiedelten Gebieten in ländlichen Räumen zu entwickeln, für die sich eine Anbindung an eine zentrale Abwasserinfrastruktur sowohl finanziell als auch ökologisch nicht lohnt.

#### Technischer Ansatz

Es existieren mehrere Methoden zur Abwasserreinigung, die unter dem Sammelbegriff der Kleinkläranlagen gefasst werden. In der Regel setzen sich die Anlagen jedoch aus einem Setzbecken zusammen, in dem die im Abwasser enthaltenen festen Stoffe ausgetrennt werden. Im Anschluss wird das so vorgereinigte Abwasser in einem biologisch-mechanischen Verfahren gereinigt.

Im Falle des Projektes wurde vor allem auf Kleinkläranlagen gesetzt, die mittels Membranfiltration die restlichen Schadstoffe aussondern. Die Membranoberfläche setzt sich aus kleinen Poren zusammen, die Schadstoffe wie Bakterien oder Pilze nicht durchdringen können. Nach der Filtration und einer Nachklärung wird das Wasser wieder dem Wasserkreislauf zugeführt und etwa für Sanitäreinrichtungen verwendet.

#### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Ziel des Projekts war es, unter den gegebenen Rahmenbedingungen (disperse Siedlungsstruktur im ländlichen Raum) und mit Beteiligung der Grundstückseigentümer und Hausbesitzer ein nachhaltiges Wasserinfrastrukturkonzept zu erarbeiten. Auf diese Weise sollte der kommunale Haushalt entlastet werden, indem Infrastrukturzubau (Abwasserkanalnetz) sowie Wasser eingespart wird.

#### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Über die Gesamtinvestitionskosten im Pilotprojekt existieren keine genauen Informationen. Die Investitionen für die Kleinkläranlagen liegen bei ca. 5000 Euro/Stück.

#### Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)

Selm liegt im Landkreis Unna. Die Region ist, bis auf die Stadt Unna, ländlich geprägt. Der Landkreis ist schrumpfend, bis 2030 prognostiziert die Bertelsmann-Stiftung einen Bevölkerungsrückgang von 8,5 %.

#### Innovationsgehalt/-kern

Der Betrieb dezentraler Kläranlagen im Rahmen eines Betreibermodells stellt die Abwasserreinigung auch im ländlichen Raum auf eine professionelle Basis. Für dünn besiedelte Gebiete ist das Konzept eine wirtschaftlich und technisch interessante Alternative.

#### Governance/Steuerungsebene und Akteure

Lippeverband in Essen; Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen; Ruhr-Forschungsinstitut RUFIS in Essen sowie das Ingenieurbüro Prof. Stein & Partner in Bochum.

- Initiator: WestLB Stiftung Zukunft NRW
- Zielgruppen/Adressat: Bewohner Dahler Feld, Stadt Selm

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Wesentliches Ergebnis der ökonomischen Analyse war, dass eine semizentrale Kläranlage für das gesamte Gebiet „Dahler Feld“ sehr teuer und schwierig umzusetzen gewesen wäre. Deshalb war eine vollständig dezentrale Lösung der Abwasserbehandlung mittels Kleinkläranlagen für die einzelnen Grundstücke die praktikablere Lösung. Die Kostenanalyse ergab, dass die konventionelle Sequential-Batch-Reactor-Technik (SBR) die günstigste Lösung darstellt, gefolgt von der Membran-Bio-Reaktor-Technik (MBR). Da diese sogenannten Membran-Kleinkläranlagen jedoch wesentlich bessere Reinigungsleistungen aufweisen, stellen sie die zukunftsfähigere technische Lösung dar. Um trotz der derzeit noch bestehenden Kostennachteile die fortschrittlichere MBR-Technik einsetzen zu können, wurden organisatorische Maßnahmen entwickelt, um die Mehrkosten für den Endverbraucher zu senken. Zwischen den Grundstücksbesitzern und dem Lippeverband wurden Dienstleistungsverträge zur Erbringung der Abwasserentsorgungsdienstleistung geschlossen. Der Verband baute die Membran-Kleinkläranlagen auf den Grundstücken seiner Kunden ein und wird die Anlagen zehn Jahre lang betreiben. Die Grundstücksbesitzer bezahlen lediglich eine monatliche Dienstleistungsgebühr, Investitionen und Betriebskosten trägt der Verband. Durch die Bündelung des Einkaufs von 25 Kleinkläranlagen seitens des Verbands konnten die Investitionskosten gesenkt werden.

### b. Bewertung Kleinkläranlagen „Dahler Feld“

**Ressourcenleichtigkeit**

Im Dahler Feld wurden in einem Wohngebiet dezentrale Kläranlagen (Mikrokläranlagen) für die Abwasseraufbereitung eingesetzt. Da in diesem Fall keine Analyse bzw. Vergleich der Ressourcenaufwände gemacht wurde, ist eine konkrete Aussage, ob dieser Schritt gegenüber den Anschluss an ein Kanalnetz ressourcenärmer ist, nicht getroffen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein solches Vorgehen in einigen Fällen ressourcensparender sein kann, als der Anschluss an ein (zentrales) Kanalsystem. Wie auch immer in dem konkreten Beispiel müssen keine entsprechenden Kanalleitungssysteme zur Zuleitung einer zentralen Kläranlage aufgebaut werden bzw. der Aufbau einer semizentralen Kläranlage wurde vermieden. Im Gegenzug fallen Ressourcenverbräuche für den Bau und den Betrieb der dezentralen Kläranlagen an. Wie sich dieses Verhältnis von semi-/dezentralen zu zentralen Kläranlagen verhält, ist nur im konkreten Einzelfall zu bewerten.

**Demografiefestigkeit**

Das System ist nicht netzgebunden und somit flexibel auf demografische Veränderungen anpassbar.

Für eine schrumpfende Bevölkerung sind solche Kläranlagen geeignet, da sie einzeln in ihrem Betrieb eingestellt werden können, ohne dass der benötigte Durchsatz einer zentralen Kläranlage hiermit gefährdet wäre. Bei einem Leerstand der Gebäude wird die Mikrokläranlage nicht genutzt bzw. kann ggf. umgesetzt werden. Zu beachten ist dabei der Abschreibungszeitraum für die Anlage.

Für eine wachsende Region ergeben sich keinerlei Probleme, da die Erweiterung des dezentralen Systems ohne Probleme vorgenommen werden kann.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Dezentrale Kleinkläranlagen können in ländlichen Gebieten eine sinnvoll Alternative zu zentralen Lösungen sein. Hier steht der Aufwand des Aufbaus eines zentralen Netzes bzw. die Länge des Anschlusses an ein zentrales Netz meist in einem ungünstigen Verhältnis zu der Anzahl der Nutzer. Die dezentrale Lösung kann eine passende Alternative sein. Der Einsatz von de- und semizentralen Kläranlagen auf Gebäude- und Quartiersebene wird zunehmend auch für urbane Räume diskutiert. Hier ist dann im Einzelfall im Rahmen integrierter Bewertungen zu prüfen, wie sich diese de-/semizentralen Systeme in Kombination mit dem zentralen Abwassersystem in puncto Ressourceninanspruchnahme und Stoff-

ströme (insb. Energie) verhalten. So kann es in einigen Fällen möglich sein, dass viele Einzelanlagen in urbanen Räumen, neben der Flächeninanspruchnahme, die Ressourceninanspruchnahme erhöht. Eine pauschale Aussage ist bezüglich der räumlichen Übertragbarkeit ist nicht möglich.

### Problembewältigungspotenzial

Das Modell reagiert auf die Probleme, die eine zentrale Infrastrukturlösung im ländlichen Raum aufwirft. Die im BPB entwickelte Alternative könnte als ein Modell dienen, um den zukünftigen ressourcenintensiven Netzausbau insbesondere im ländlichen, dünn besiedelten Raum zu vermeiden.

Das kombinierte Finanzierungs- und Managementmodell eignet sich, um in dispersen ländlichen Siedlungen die Abwasserinfrastruktur auf Basis von Kleinkläranlagen zu bezahlbaren Preisen für die Nutzer zu gewährleisten.

### Innovationskraft

Das Vorhaben weist sowohl eine technische Innovationskraft (MBR- Kleinkläranlagen) auf, als auch eine institutionelle – durch das dezentrale Betreibermodell, das die Grundstückseigentümer zu Partnern der Stadtwerke/Zweckverbände werden lässt. Gerade letztere muss hier hervorgehoben werden, da die Anwendung eines Contracting-Modells im Rahmen einer Infrastrukturmaßnahme sehr innovativ ist.

### Infrastruktureller Kontext

Der infrastrukturelle Kontext ist, wie bereits erwähnt, ein dezentraler. Jeder Haushalt besitzt seine eigene Kläranlage auf dem Grundstück.

### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Der Bürger ist direkt betroffen, da die Anlage in der Umgebung der Wohnbebauung installiert wird. Gleichsam ist die Anlage nach Installation wenig sichtbar. Die Hürden (z. B. Kosten) zur Einrichtung sind aber recht groß, wenn kein entsprechendes Finanzierungsmodell vor Ort existiert.

Zusätzlich wird die Kostenfrage für die Akzeptanz eine Rolle spielen. Das hier vorgestellte System löst diese Problematik jedoch pragmatisch, sodass die Investition für jeden Bürger zu bewältigen sind.

### Ökonomische Tragfähigkeit

Die ökonomische Tragfähigkeit ist im BPB gegeben. Die Kosten für die Stadt Selm, das Gebiet an ein zentrales System anzuschließen, hätten höhere Kosten verursacht. Die hohen Kosten für ein zentrales System war der Anlass alternative Lösungen zu reflektieren. Die vorgestellte Version entspricht demnach der wirtschaftlichsten Lösung. Mittlerweile sind solche Kleinkläranlagen für ca. 5000 Euro erwerbbar. Die Belastung für die Haushalte, noch dazu abgesichert über ein Contracting-Modell ist damit kalkulierbar.

### Quellen

http://www.kleinklaeranlagen-aquamax.de/produkte/puroo-kleinklaeranlage.html (10.03.2016).

http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/profil/de/produktblaetter/produktblatt_akwa-dahler-feld.pdf (10.03.2016).

http://www.baulinks.de/webplugin/2006/1875.php4 (10.03.2016).

https://www.baufachinformation.de/literatur/10039016267 (10.03.2016).

## 2.3 BPB im Cluster Mobilität

### 2.3.1 Optimierung der Warenlieferungslogistik mit dem Cargohopper

Mit diesem Best Practice Beispiel werden die Teilsysteme (Güter-)Verkehr, Strom und Abfallentsorgung adressiert. Zuerst führte die Stadt Utrecht Cargohopper im Jahr 2009 ein. Danach folgten Amsterdam, Enschede und Groningen. Durch Cargohopper wird ein Teil des Güterverkehrs in der Innenstadt durch elektrisch angetriebene Sondertransporter abgewickelt. Die Einführung einer Umweltzone in Kombination mit Gewichtsbeschränkungen in Utrecht war ausschlaggebend für ein neues Konzept für die Belieferung der engen Straßen des Stadtzentrums eingeführt. Im Rahmen des Konzepts führte das Logistikunternehmen Hoek Transport den Cityhopper ein.

In Utrecht wurde das System im Herbst 2016 eingestellt.[111] In Amsterdam, Enschede und Groningen ist es noch in Betrieb.

#### a. Beschreibung Cargohopper

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Der Cargohopper steht für eine stadtverträgliche, flächeneffiziente und schadstofffreie Innenstadtlogistik. Im Bereich der erneuerbaren Energien für die Strom- und Wärmeproduktion wurden in Europa in den letzten Jahren Erfolge mit Blick auf den Klimaschutz erzielt. Dem gegenüber sind im Verkehrssektor in Europa von 1990 bis 2010 die $CO_2$-Emissionen um 28 Prozent gestiegen. Des Weiteren ist zu beobachten, dass in den letzten Jahren durch die Änderung des Konsumverhaltens (z. B. Kauf von Waren im Internet/E-commerce) der Warentransport bzw. Lieferverkehr in den Städten zugenommen hat. Der Wirtschaftsverkehr führt neben den $CO_2$-Emissionen gerade in Städten zu weiteren Problemen wie Feinstaubbelastung, Flächenverbrauch, Staus, Unfällen, etc., um nur einige anzusprechen. In Berlin wollen beispielsweise Zalando oder Amazon in naher Zukunft bereits 1–2 Stunden nach Bestellung die Waren an Kunden ausliefern. Gerade in engen Altstadtgassen wird der Lieferverkehr zunehmend zu einem Fremdkörper und Hindernis. Bei innerstädtischen Transporten liegt die Fahrzeugauslastung nicht immer bei über 80 Prozent, weshalb intelligente Logistikkonzepte eine große Herausforderung darstellen.

Die Vorteile der Transporter sind zum einen die geringe Umweltbelastung durch die Fahrzeuge, da die Elektromotoren weder $CO_2$ noch andere Luftschadstoffe emittieren und leiser sind. Dadurch kann die Umweltbelastung in der Innenstadt reduziert werden. Außerdem sind die Fahrzeuge nur 1,25m breit. Dadurch sind die engen und nicht für den modernen Güterverkehr ausgelegten Straßen der Altstadt Utrechts weniger „voll“, und anderer Fuß-, Rad- oder Kfz-Verkehr kann besser abgewickelt werden. In den vorhergehenden Jahren wurden vermehrt Schäden an den historischen Bauwerken der Altstadt gemeldet, die auf die hohen Erschütterungen durch den Güterverkehr zurückzuführen waren. Die leichteren Cargohopper bringen weniger Gewicht auf die Straße. Damit können die durch Güterverkehr verursachten Gebäudeschäden verringert werden.

111 Nach Auskunft von Herrn Rozendaal von der Firma Cargohopper Stadsdistributie musste der Betrieb in Utrecht eingestellt werden (Difu-Seminar „Handlungsdruck durch den städtischen Wirtschaftsverkehr und Lösungsvorschläge“ am 29. November 2016). Durch die Umweltzone und der Gewichtsbeschränkung war in Utrecht der Warentransport durch „andere“ zwar reglementiert, es wurde jedoch nicht umfassend kontrolliert. Das aufgebaute Warentransportsystem konnte somit von anderen Transportdienstleitern umgangen werden, womit das Cargohopper-System nicht mehr wirtschaftlich war.

### Technischer Ansatz

Der Cargohopper I besteht aus einer elektrisch betriebenen Zugmaschine mit mehreren Anhängern mit aufgebauten Boxen, ähnlich den an Flughäfen alltäglichen Gepäcktransportern. Dieser Zug ist 1,25 Meter breit und bis zu 16 Meter lang. Zum Antrieb verfügt das Fahrzeug über einen 28-PS-Elektromotor (48 Volt). Die maximale Reichweite beträgt 30 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 20 km/h.

Der Cargohopper ist für die Zustellung von Paketen konzipiert. Die drei Mini-Container können wie konventionelle mit Hilfe eines Gabelstaplers auf und abgesetzt werden. Dies ermöglicht die Anbindung an ein eigenes Logistiksystem (dort findet auch eine Bündelung der Sendungen statt). Die Fahrzeuge pendeln zwischen einem Sammel- und Verteilzentrum außerhalb des Zentrums und dem Stadtkern. Sendungen, die für Empfänger im Innenstadtbereich bestimmt sind, werden zunächst in das *Hoek Transport*-Distributionszentrum am Stadtrand geliefert. Von dort transportiert ein Lkw die in Boxen gepackten Sendungen gebündelt in das Cargohopper-Verteilzentrum. Von dort erfolgt die Fein-Distribution im Innenstadtbereich mittels zweier Cargohopper-Modelle. Da genau 8 der kleinen Container auf einen LKW passen ist auch die Übergabe an der Stadtgrenze leicht zu lösen. Nach der Auslieferung fährt der Cargohopper nicht einfach zurück, sondern sammelt Pappkartons, Papier und leere Verpackungen wieder ein und bringt diese zum Recyclinghof.

Zum Transport von Paletten und Roll-Containern wurde Cargohopper II entwickelt. Im Vergleich zu Cargohopper I besteht es aus einem Auflieger und einer Zugmaschine. Für Fahrten außerhalb des Innenstadtgebiets besitzt diese eine maximale Reichweite von 200 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h.

Seit 2009 ist der Cargohopper mit Solarpanels auf dem Dach ausgerüstet. Auf diese Weise soll er die benötigte Energie zum Teil selbst produzieren und ist somit nicht mehr ausschließlich auf die Ladeinfrastruktur angewiesen.

### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Es sollte den Herausforderungen großer Verkehrsstaus, Lärm, schlechter Luftqualität durch $CO_2$- und andere Schadstoff-Emissionen, Sicherheit und „Qualität in der Innenstadt“ begegnet sowie die Nutzung der engen Straßen in Utrechts Altstadt optimiert werden.

### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Es gab von der Stadt Utrecht keine finanzielle Unterstützung bei dem Aufbau des Systems. Die Firma Hoek hat die Investitionskosten getragen.[112]

### Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)

Die Stadt Utrecht ist urban geprägt und wachsend.

### Innovationsgehalt/-kern

Das Gesamtkonzept für die Innenstadt umfasst die Einführung einer Umweltzone in Kombination mit Gewichtsbeschränkungen. Für die Warenlieferungen mussten neue Ideen entwickelt werden. Der Cargohopper pendelt zwischen einem Sammel- und Verteilzentrum außerhalb des Zentrums und dem Stadtkern. Die Fahrzeuge der Cargohopper sind nur 1,25m breit. Dadurch sind die engen und nicht für den modernen Güterverkehr ausgelegten Straßen der Altstadt weniger „voll“ und anderer Fuß-, Rad-

112 Die Stadt Amsterdam fördert die Anschaffung von Cargohopper II-Fahrzeugen über ihr Elektromobilität-Förderprogramm. Siehe: http://www.zukunft-mobilitaet.net/120226/konzepte/innenstadtlogistik-cargohopper-konzept-staedtischer-lieferverkehr-elektromobilitaet-ohne-stau/.

oder Kfz-Verkehr kann besser abgewickelt werden. Cargohopper dürfen in Utrecht Busspuren benutzen.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

TransMission (größter Verbund von selbstständigen Transport- und Speditionsfirmen in den Niederlanden und Belgien). Kooperation zwischen Stadtverwaltung und Logistikunternehmen.

- Initiator: Stadtverwaltung Utrecht; Logistikunternehmen Hoek Transport
- Zielgruppen/Adressat: (Güter-)Transportunternehmen, Paketdienste, Abfallentsorgung

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Cargohopper wird seit 2009 eingesetzt und ersetzte in Utrecht jährlich über 100.000 km innerstädtische Lkw-Fahrten. Damit einher geht eine entsprechende Vermeidung an $CO_2$-Emissionen. Nachdem der Cargohopper zunächst in Utrecht eingesetzt wurde, konnte das Einsatzgebiet mittlerweile auch auf die Städte Enschede, Amsterdam und seit 2015 auch auf Groningen ausgeweitet werden. Der Cargohopper schont die Umwelt sowie die Straßen und Häuser der Altstadt.

Ende 2016 wurde dem Auftragnehmer im Gespräch mit Herrn Roozendaal von der Firma Cargohopper mitgeteilt, dass es in Utrecht Probleme mit der Wirtschaftlichkeit gäbe, da weiterhin „andere“ Transporter in das Stadtzentrum fahren und Waren ausliefern. In Utrecht wurde der Betrieb deshalb eingestellt.

**b. Bewertung Cargohopper**

**Ressourcenleichtigkeit**

Das intelligente Warentransportsystem Cargohopper reduziert in großem Maße den Einsatz fossiler Energieträger, da die Elektrofahrzeuge mit Ökostrom betrieben werden und ihre Konstruktion auf einen geringen Energieverbrauch ausgelegt ist. Dadurch werden reduziert die $CO_2$- und Luftschadstoff-Emissionen und Lärm verringert.

Eine wichtige Rolle zur Ressourcenleichtigkeit nimmt auch die Bündelung der Warensendungen (z. B. Vermeidung von Leerfahrten) und die Rückführung von Verpackungsabfällen ein. Auf diese Weise werden zusätzlich Energieverbräuche minimiert. Die Reduzierung des Stauaufkommens in der Innenstadt erzielt denselben Effekt.

Des Weiteren sind durch gute Lastverteilung geringere Schäden an der Straßeninfrastruktur zu erwarten. Die Straßeninfrastruktur bedarf bei diesem System weniger Sanierung; es werden weniger Ressourcen in Anspruch genommen. Denn der Wirtschaftsverkehr mit den schweren Fahrzeugen erzeugt häufig Schäden an den Straßen.

Durch eine derart optimierte Logistik in den Städten können zusätzlich Flächen eingespart werden.

**Demografiefestigkeit**

Dieses System ist nicht netzgebunden und sehr flexibel in Bezug auf Änderungen der Bevölkerungsstruktur, da es nicht mit fester Infrastruktur verknüpft ist. Eine Anpassung der Logistik an eine schrumpfende wie auch wachsende Gesellschaft ist ohne große Probleme umsetzbar. Somit ist das System als demografiefest zu bezeichnen.

Eine Änderung des Konsumverhaltens mit Minderung/Erhöhung der Liefertätigkeiten könnte stärkere Auswirkungen haben. Tendenziell kann eher von einem Wachstum des Waren- und Lieferverkehrs durch Onlinehandel ausgegangen werden. Vor diesem Hintergrund gewinnt das Beispiel an zusätzlicher Relevanz.

### Räumliche Übertragbarkeit

Das System wurde auf andere Städte in den Niederlanden übertragen wie Amsterdam, Enschede, Groningen. Es eignet sich besonders für urbane Räume. Auch in Deutschland existieren grundsätzlich Steuerungsmöglichkeiten der Kommune, um eine Umstellung des Warenlieferverkehrs zu forcieren. So wurden im Rahmen eines City-Logistik-Konzeptes in Augsburg Reglementierungen getroffen, die die innerstädtische Einfuhr auf Fahrzeuge mit bestimmten Eigenschaften beschränkt. Eine Förderung ressourcenleichter Lösungen wäre prinzipiell möglich.

Im ländlichen Raum stellt sich momentan das Problem der Reichweite der Fahrzeuge. Auch sind hier nicht derartige Einsparungen zu erzielen, da die Effekte der lokalen Verkehrsinfrastrukturentlastung wegfallen.

### Problembewältigungspotenzial

Das Problem des Warenverkehrs kann auf alle deutschen Kommune übertragen werden, womit die Potenziale einer optimierten Logistik als hoch einzuschätzen sind. DHL testet unterdessen ein ähnliches Modell. Vor dem Hintergrund eines zu erwartenden Anstiegs des Warenlieferverkehrs durch E-Commerce besitzt das Projekt ein hohes Problembewältigungspotenzial. Es ist nicht nur ressourcenleicht, sondern trägt auch zum Klimaschutz und einer geringeren Umweltbelastung bei.

Da der Logistiksektor einen relativ großen Anteil am Verkehrsaufkommen besitzt und tendenziell zunehmen wird, ist ein Umdenken in der Branche aus kommunaler Sicht wünschenswert. Zudem ist die Marktsituation im Warenlieferverkehr so beschaffen, dass mit der Umrüstung der Flotten einiger großer Unternehmen ein signifikanter Effekt erzielt werden kann. Im Gegensatz hierzu gestaltet sich die Umrüstung des privaten MIV aufgrund der strukturellen Eigentumsverhältnisse wesentlich schwieriger.

### Innovationskraft

Das intelligente Logistikkonzept ist aufgrund der erzielten Bündelung der Sendungen und der Vermeidung von Leerfahrten durch die Abfuhr von Abfällen innovativ, insofern es Energie einspart und den Verkehr reduziert. So kann das Konzept durchaus positive Auswirkungen auf das allgemeine Zusammenleben in urbanen Räumen haben, da weniger Verkehr und geringere Geschwindigkeiten die Verkehrssicherheit erhöhen, den Lärm verringern sowie die Nahmobilität stärken können. Das Konzept ist erfolgreich und hat Vorbildcharakter; es wurde bereits auf weitere Kommunen in den Niederlanden übertragen. Gleichzeitig knüpft das Projekt eine Verbindung zwischen den Sektoren Mobilität und Verpackungsabfall.

### Infrastruktureller Kontext

Das System ist zentral organisiert. Die Flotte des Cargohoppers ist auf keine zentrale Energieerzeugungsanlage angewiesen, sondern kann theoretisch überall eingesetzt werden, wo eine entsprechende Ladeinfrastruktur besteht. Durch die nachgerüsteten Solarpanels auf dem Dach sind die Fahrzeuge teilweise sogar autonom von Ladeinfrastrukturen.

### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Die Verringerung des Warenverkehrs und die Reduzierung der Emissionen in den Innenstädten sind durchweg positive Effekte für die Bürger. Die soziale Akzeptanz ist damit potenziell gegeben.

### Ökonomische Tragfähigkeit

Die Kosten wurden in Utrecht aus privater Hand von Cargohopper getragen. Die Wirtschaftlichkeit ist gegeben, wenn gleichzeitig die Warentransporte „anderer“ Teilnehmer minimiert werden können, was

in Utrecht nicht gelungen ist. Die Erweiterung des Systems auf andere Städte wurde teilweise durch Kommunen gefördert.[113] Dies geschah eher vor dem Hintergrund der Investition in einen Zukunftsmarkt. Die Umrüstung erzielt für Kommunen positive Effekte, und wird langfristig Kosten senken, die sonst für Instandhaltung von privaten und kommunalen Gebäuden und der Verkehrsinfrastrukturen anfallen würden. Für den Systembetreiber reduzieren sich die Wartungskosten, die bei Elektrofahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungstechnologien geringer sind.

**Link/Kontakt**

Cargohopper
Rutherfordweg101, 3542 CN Utrecht
fon +31 (0)30 6778080
email info@cargohopper.nl
http://www.cargohopper.nl/

**Quellen**

http://www.bestfact.net/wp-content/uploads/2013/08/CL1_12_QuickInfo_Cargohopper-26July2013.pdf (13.04.2016).

http://www.zukunft-mobilitaet.net/120226/konzepte/innenstadtlogistik-cargohopper-konzept-staedtischer-lieferverkehr-elektromobilitaet-ohne-stau/ (13.04.2016).

https://amsterdamsmartcity.com/products/cargohopper

### 2.3.2 Nachhaltige Mobilität im urbanen Raum durch Umsetzung des Fahrradkonzepts Kopenhagen

Dieses Beispiel adressiert die Teilsysteme nachhaltige Mobilität und Energie. Kopenhagen ist eine der radfreundlichsten Städte der Welt. Insgesamt durchziehen mehr als 350 Kilometer Radwegnetz die Stadt. Dies schlägt sich vor allem im sehr hohen Radfahreranteil nieder. Hintergrund dieser Erfolge – die neben anderem Kopenhagen zu den attraktivsten Städten der Welt gemacht haben – ist die konsequente Umsetzung des Fahrradkonzepts „*The City of Copenhagen's Bicycle Strategy 2011–2025*" aus dem Jahr 2011.[114]

#### a. Beschreibung Fahrradkonzept Kopenhagen

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Die Förderung von Fahrradverkehr liefert einen positiven Effekten für die Umwelt, das Klima, die Lebensqualität in den Städten und Gemeinden sowie für die Gesundheit der Menschen (Luftqualität, Lärm, Verkehrssicherheit, Gesundheit und Naturschutz); außerdem Beiträge zu vielen aktuellen und zukünftigen verkehrspolitischen und gesellschaftlichen Herausforderungen. Die Ressourceninanspruchnahme kann durch die Verlagerung von fossil angetriebenen Fahrzeugen zu alternativen Transportmöglichkeiten wie etwa dem Fahrrad deutlich reduziert werden. Durch die Nutzung von Fahrrädern werden die Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe, der Lärm, Flächenverbrauch, und die Abnutzung von Verkehrsinfrastruktur, etc. reduziert.

Die Raddichte in der dänischen Hauptstadt ist so hoch, dass sich auf vielen Radwegen zu den Hauptverkehrszeiten Staus bilden. Insbesondere der Radweg entlang der Hauptverkehrsader Nørrebrogade

113 In Amsterdam wurde der Einführung des Systems Cargohopper durch Finanzmittel eines Förderprogramms unterstützt.

114 The City of Copenhagen's Bicycle Strategy 2011–2025/Technical and Environmental Administration, Traffic Department (http://www.cycling-embassy.dk/2012/01/20/good-better-best-the-city-of-copenhagens-bicycle-strategy-2011-2025/) (09.02.2016)

ist mit 36.000 Radfahrern am Tag chronisch überlastet. Deshalb sollen Fahrradwege verbreitert und der Autoverkehr soll aus der Straße verbannt werden und nur noch Busse dürfen die 2,5 Kilometer lange Straße nutzen. Entlang der „Radwegautobahn", sogenannte „Cykelsuperstiers", sollen mehrere Service-Stationen aufgebaut werden, an denen Radfahrer die Reifen aufpumpen, Speichen wechseln oder sich ausruhen können. Synchronisierte Ampelanlagen sollen Radlern eine höhere Priorität gegenüber Autofahrern einräumen. Damit wird der Verkehrsfluss für Radler beschleunigt und gleichzeitig für Autofahrer verlangsamt. Dies soll noch mehr Leute dazu bewegen, das Auto stehen zu lassen und das Rad zu nutzen. Bereits heute radeln 55 % der Pendler mit dem Rad zur Arbeit. Aber insbesondere die Pendler von außerhalb sollen zum Umstieg auf das Rad bewegt werden. Heute werden 37 % der Wege aus oder in die Stadt Kopenhagen mit dem Fahrrad zurückgelegt. Dieser Wert soll bis 2015 auf über 50% gesteigert werden. Hauptzielgruppe sind Pendler, die täglich zwischen fünf und 20 Kilometer zwischen Wohn- und Arbeitsort zurücklegen.

**Technischer Ansatz**

Um die erzielten Erfolge in Kopenhagen zu verstetigen, will die Kommune die fahrradfreundliche Infrastruktur in den Mittelpunkt ihres Handelns stellen. Es gelten zwei zentrale Prinzipien im Fahrradbereich: Priorisierung und Innovation.

Priorisierung: Die Radverkehrsanlagen sind während der Spitzenzeiten permanent überlastet. Deshalb ist es unumgänglich den Radfahrern auf den Hauptrouten mehr Platz einzuräumen. Um das Sicherheitsempfinden zu erhöhen, muss es den Menschen möglich gemacht werden in der von ihnen bevorzugten Geschwindigkeit zu radeln und nicht zuletzt muss das Radfahren für die Menschen attraktiv gemacht werden, die sich momentan noch nicht aufs Rad trauen. Deshalb sollen Radverkehrsanlagen an einigen Stellen erweitert werden und dort – wo es möglich ist – Entlastungsrouten ausgewiesen werden. Der Infrastrukturausbau wird von Kampagnen begleitet, die den Fokus auf einen freundlicheren Umgang im Verkehr richten sollen. An vielen Stellen müssen ambitionierte Bauwerke wie Fahrradtunnel, Brücken über Gewässer, Bahnstrecken oder große Straßen entstehen. Dazu kommen viele kleine Maßnahmen zur Erhöhung der Radverkehrsgeschwindigkeit wie die Freigabe von Einbahnstraßen, die Erlaubnis große Plätze queren zu dürfen, die Implementierung von mehr grünen Wellen für Radfahrer und so weiter. Letztendlich werden auch Verkehrsberuhigungsmaßnahmen, zum Beispiel auf Straßen in der Nähe von Schulen, helfen die Sicherheit zu erhöhen – wobei immer im Vordergrund stehen soll, dass für den Radverkehr wirkliche Vorteile im Straßenverkehr erreicht werden können.

**Innovation (Auswahl): In Kopenhagen ist die Infrastruktur für den Langsamverkehr, vor allem für den Radverkehr, sehr gut ausgebaut. Die Radwege sind durch einen Randstein vom anderen fließenden Verkehr abgetrennt, auf Kreuzungen gibt es extra blau markierte Fahrradspuren. Des Weiteren haben die Autofahrer in Kopenhagen eine besondere Art der Rücksicht gegenüber Radfahrern entwickelt. Dies vermeidet vor allem Unfälle bei rechts abbiegenden Fahrzeugen.**

Die erste „Radwegeautobahn – Copenhagen-Albertslund" ins Umland mit einer Gesamtlänge von über 22 Kilometern wurde Ende 2011 für den Verkehr freigegeben. Insgesamt sollen 26 „Radwegeautobahnen" gebaut werden mit einer Länge von ca. 300 km. Die Infrastruktur für Fahrradwege wird damit um 15% erhöht. Weitere Cykelsuperstier werden derzeit in Århus, Odense und Aalborg angelegt. Entlang der „Radwegautobahn", sollen mehrere Service-Stationen aufgebaut werden, an denen Radfahrer die Reifen aufpumpen, Speichen wechseln oder sich ausruhen können. Synchronisierte Ampelanlagen sollen Radlern eine höhere Priorität gegenüber Autofahrern einräumen. Damit wird der Verkehrsfluss für Radler beschleunigt und gleichzeitig für Autofahrer verlangsamt.

Die Radwege der Nørrebrogade gelten als die meistbefahrenen Radwege Europas. Daher haben sich die Stadtplaner dazu entschlossen, die Nørrebrogade in einen „grünen Boulevard" zu verwandeln. Die Radwege an beiden Seiten der Straße sollen auf mehr als dreieinhalb Meter verbreitert werden. Der

Autoverkehr soll aus der Straße verbannt werden und nur noch Busse dürfen die 2,5 Kilometer lange Straße nutzen.

Ambitionierte Abkürzungsmöglichkeiten wie die Bryggebroen, die Fußgänger- und Radfahrerbrücke über den Hafen, bringen einen sehr hohen Nutzen. Seit Fertigstellung der Brücke im Jahr 2006 stieg dort die Zahl der erfassten Radfahrer von 3.000 auf nun über 9.000. Dort konnten Wege zwischen Wohnung und Arbeit verkürzt werden, die autofreie Verbindung ist sicher, komfortabel und attraktiv, nicht nur für die Bewohner neuer Stadtentwicklungsgebiete.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Ziel der Strategie „*The City of Copenhagen's Bicycle Strategy 2011–2025*" ist es bis zum Jahr 2025 zur fahrradfreundlichsten Stadt der Welt zu werden. Dieses Ziel ist Teil der Strategie Kopenhagen zur $CO_2$-neutralen Umwelthauptstadt mit einer hervorragenden Lebensqualität zu machen. Außerdem erfolgt die Förderung des Radverkehrs auch im Sinne der offiziellen Gesundheitsstrategie. 2010 wurden werktags (6 bis 18 Uhr) in der Innenstadt rund 180.000 Wege mit dem Fahrrad unternommen, bis 2025 sollen nochmals 60.000 Fahrradfahrten hinzukommen. Die Stadt möchte dieses Ziel durch Kapazitätserweiterungen erreichen.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

Die Stadt gab im Jahr 2011 etwa 10 Millionen Euro für Radinfrastruktur aus. Zwischen 2006 und 2010 wurden 33,5 Millionen Euro investiert.

Es wird geschätzt, dass der Ausbau des Fahrradwegenetzes um 15 Prozent, die öffentlichen Ausgaben um 40,3 Mio. Euro im Jahr reduziert, da die Nutzer eine bessere Gesundheit aufweisen.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Kopenhagen ist urban geprägt und wachsend.

**Innovationsgehalt/-kern**

Fahrradinfrastruktur schafft Anreize zum Umsteigen von MIV, Wirtschaftsverkehr (z. B. Warenanlieferungen) auf alternative Mobilitätsformen. Zudem unterstützt dies den intermodalen Ansatz.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Stadt Kopenhagen

- Initiator: Stadt Kopenhagen
- Zielgruppen/Adressat: Bevölkerung, Touristen

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Seit 1998 nahmen die per Rad zurückgelegten Kilometer um 30 Prozent zu, der Radverkehrsanteil im Alltagsverkehr stieg sogar um mehr als ein Drittel auf 38 Prozent, womit das Fahrrad zum populärsten Transportmittel im Berufsverkehr aufstieg. Dies sind circa 1,2 Millionen Kilometer täglich. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 16 km/h.

### b. Bewertung Fahrradkonzepts Kopenhagen

**Ressourcenleichtigkeit**

Die Ressourceninanspruchnahme kann durch die Verlagerung von fossil angetriebenen Fahrzeugen zu alternativen Transportmöglichkeiten wie etwa dem Fahrrad deutlich reduziert werden. Durch die Nutzung von Fahrrädern werden die Treibhausgasemissionen, Luftschadstoffe, der Lärm, Flächenver-

brauch, und die Abnutzung von Verkehrsinfrastruktur, etc. reduziert. Die Nutzung von Fahrrädern ist somit sehr ressourcenleicht, da bei der Nutzung keine fossilen Kraftstoffe genutzt werden. Des Weiteren ist der Platzbedarf von Fahrrädern im Vergleich zum MIV oder der Wirtschaftsmobilität deutlich geringer. Der Flächenbedarf pro Person und Verkehrsmittel[115] liegt bei einem PKW bei 100 $m^2$, bei einem Fahrrad bei 10 $m^2$ und bei Fußgänger bei 2 $m^2$, Verkehrsflächen können bei Minimierung von MIV reduziert werden (z. B. Parkraum) und für andere Zwecke genutzt werden (z. B. Grünflächen, Urban Gardening). Die Abnutzung der Verkehrsflächeninfrastruktur ist bei Nutzung durch MIV und vor allem Wirtschaftsverkehr deutlich höher als bei der Nutzung durch Fahrräder (auch Lastenräder für Warentransport). Die Sanierung von Straßen kann in größeren Abständen vollzogen werden, was Ressourcen spart. Bei einer ausschließlichen Nutzung der Wegeinfrastruktur durch Nahmobilität (Fuß und Fahrrad) wird weniger Fläche benötigt und Infrastruktur kann mit einem geringeren Materialaufwand gebaut werden. Der Energie- und Materialaufwand für die Erstellung eines Fahrrads ist im Vergleich zu Fahrzeugen des MIV oder LKW um ein vielfaches ressourcenleichter.

**Demografiefestigkeit**

Der Aufbau von Fahrradinfrastruktur ist relativ robust gegenüber dem demografischen Wandel. Bei geringerer Nutzung im Falle von Schrumpfungstendenzen sind die Instandhaltungskosten gering, dies vor allem im Vergleich zu Instandhaltung von Infrastruktur für ÖPNV oder MIV. Die Alterung der Bevölkerung wird keine großen Auswirkungen haben, da bereits heute in vielen Fällen auf Pedelecs oder E-Bikes zurückgegriffen wird.

In wachsenden Gesellschaften kann bei der Förderung des Fahrradverkehrs auf vorhandener Infrastruktur angeknüpft bzw. diese erweitert werden – in Relation zur MIV-Infrastruktur gleichsam mit geringerem Aufwand an Ressourcen (Materialien, Energie, Fläche) und Kosten.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Im nationalen Radverkehrsplan 2020 der Deutschen Bundesregierung aus dem Jahr 2013 wird festgehalten, dass der Radverkehr einen wichtigen und wachsenden Anteil am Verkehrsaufkommen in Deutschland dar stellt. Ziel des Radverkehrswegeplans 2020 ist es, ausgehend vom bundesweiten Radverkehrsanteil von 10 % im Jahr 2008, den aufkommensbezogene Anteil des Radverkehrs bis zum Jahr 2020 deutlich zu steigern. Bei entsprechenden fahrradfreundlichen Rahmenbedingungen ist das Potenzial dafür vorhanden.

Vor allem in urbanen und wachsenden Regionen entsteht Druck auf Verkehrsflächen. Hier kann ein umfassendes Fahrradkonzept entlasten. Es ist jedoch auch für suburbane Regionen geeignet. In ländlichen Räumen sind die Distanzen mitunter zu groß, als das ein umfangreicher Umstieg auf Fahrradverkehr wahrscheinlich erscheint. Partiell ist dies jedoch auch dort möglich, vor allem vor dem Hintergrund der vermehrten Nutzung von Pedelecs und E-Bikes.

**Problembewältigungspotenzial**

Das Konzept enthält eine Fülle an Maßnahmen zur Förderung des Fahrradverkehrs – bei gleichzeitiger Reduzierung des MIV. Dies führt zu vielfältigen Synergien, etwa im Bereich Ressourceneffizienz, Klimaschutz, und Bodenschutz, Flächenentsiegelung, Reduzierung von Luftschadstoffen, Lärmreduktion und besserer Gesundheit. Durch Einsparungen etwa im Straßenbau oder bei der Wahl der Mobilitätsmittel kann die regionale Wertschöpfung gesteigert werden. Bis 2025 sollen in Kopenhagen 50 % aller Anreisen zu Arbeitsplätzen und Ausbildungsstätten mit dem Fahrrad erfolgen. Hiermit würde die Stadt also einen Großteil des gesamten Verkehrsaufkommens verlagern. Wie bereits beschrieben ist das Fahrradkonzept damit nicht nur sehr ressourcenleicht, sondern wird entsprechend positive Effek-

115 Berechnungen der Stadt Zürich, Tiefbauamt, Mobilität + Verkehr, 2011.

ten auf das Mikroklima der Stadt und die Gesundheit der Einwohner haben, was angesichts des Klimawandels auch von Bedeutung ist.

**Innovationskraft**

Die Förderung des Fahrradverkehrs führt zu neuen Mobilitätsstrukturen – vor allem der intermodale Ansatz, nachdem die Nutzer zwischen dem jeweils geeigneten Transportmittel wählen können, wird gestärkt. Zudem werden Konzepte des Teilens (Carsharing, Bikesharing) eine größere Rolle einnehmen. Das Konzept ist daher vor allem in institutioneller Hinsicht innovativ, da es als Katalysator für Intermodalität fungiert.

Wenn eine Stärkung des Fahrradverkehrs mit einer Minderung des MIV und des Warenverkehrs[116] einhergeht, ist eine andere Aufteilung und Nutzung des öffentlichen Stadtraums nötig/möglich, da Verkehrsflächen einen hohen Platzbedarf einnehmen. Dass das Konzept funktioniert beweisen die Statistiken, denen zufolge Kopenhagen den höchsten Anteil an Fahrradfahrern unter den europäischen Städten mit mehr als 300.000 Einwohnern besitzt. Zum Vergleich: In Berlin liegt der Anteil bei 13 %. Gleichsam muss man anmerken, dass der Anteil des MIV's in Kopenhagen wie in Berlin bei 30 % liegt. Vor diesem Hintergrund ist darauf hinzuweisen, dass ein solches Fahrradkonzept ergänzt werden muss durch Ansätze, die auf die strukturell scheinbar anders gelagerten Probleme reagieren, die dafür verantwortlich sind, dass der MIV trotz Anstieg des Fahrradverkehrs sich nicht wesentlich reduziert.[117] Zu nennen wäre hier die City-Maut in Stockholm, die zu einer deutlichen Verlagerung des MIV geführt hat (siehe unten).

**Infrastruktureller Kontext**

Auch wenn die benötigte Infrastruktur in gewissem Sinne zentral aufgebaut und gesteuert wird, adressiert das Konzept überwiegend dezentrale Lösungen – insbesondere der im Hintergrund stehende intermodale Ansatz ist hier zu nennen. Die Möglichkeit bei einem intermodalen Ansatz an verschiedenen Stationen die Fortbewegungsmittel zu wechseln ist eher als dezentral einzustufen, wenngleich die Systeme für sich zentral organisiert sind.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Die Verringerung des MIV und eine Reduzierung der Emissionen in den Innenstädten haben positive Effekte für die Stadtbürger. Das Mikroklima wird verbessert, der Lärm reduziert, die Sicherheit gesteigert. Gerade in urbanen Räumen, die bislang vom Verkehr dominiert sind, verbessert sich die Aufenthaltsqualität in erheblichem Maße. Zu berücksichtigen ist, dass auch für die Radwege, insbesondere für die ‚Radautobahnen' ebenso Infrastruktur aufgebaut werden muss, wenngleich in geringerem Maße als dies der MIV erfordert. Trotzdem sind auch hier bei der Planung der Strecken die Belange von Anwohnern und Betroffenen zu berücksichtigen. Es ist damit zu rechnen, dass ein umfassendes Fahrradkonzept von einem MIV-affinen Milieu eher abgelehnt wird. In dieser Hinsicht bietet das Konzept eingeschränktes Konfliktpotenzial. In Kopenhagen wurde mit einer erfolgreichen Kommunikationsarbeit solchen Probleme entgegengewirkt.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Erstellung einer Strategie oder eines Konzepts zur Förderung des Fahrradverkehrs in urbanen Räumen ist ökonomisch in Kommunen umsetzbar, ist jedoch abhängig von der Prioritätensetzung in der Verwaltung. Investitionen in Fahrradinfrastruktur müssen umgesetzt werden und sind mit Kosten

116 Die Post in Kopenhagen nutz fast nur noch ausschließlich Fahrräder oder Lastenfahrräder. Viele Unternehmen nutzen Lastenfahrräder für den Verkauf von Produkten (z. B. Sushi, Kaffee).

117 http://www.epomm.eu/tems/ (zuletzt abgerufen am 15.06.2016).

verbunden. Kosten können gespart werden, wenn bei einem Ausbau der Fahrradinfrastruktur gleichzeitig in anderen Bereichen (z. B. MIV) Einsparungen getroffen werden. Investitionskosten für Fahrradinfrastruktur sind im Vergleich zum Straßenbau (z. B. für MIV) ungleich niedriger. Bei einer gesamtgesellschaftlichen Betrachtung werden Einsparungen im Gesundheitsbereich (bessere Gesundheit, weniger Unfälle) eine nicht unerhebliche Rolle spielen (siehe Kopenhagen). Die Stadt Kopenhagen schätzt, dass jeder Kilometer, der von einer Person per Rad zurückgelegt wird, der Gesellschaft einen Nettogewinn von 1,22 DKK (0,16 Euro) bringt, während zum Vergleich jeder im Auto zurückgelegte Kilometer einen Verlust von 0,69 DKK bringt (0,09 Euro). Zu erwähnen ist auch, dass in Kopenhagen die Förderung des Fahrradverkehrs zu direkten und indirekten wirtschaftlichen Vorteilen führt. So existieren u.a. 289 Fahrradgeschäfte in Kopenhagen, außerdem 20 Unternehmen, die Fahrräder entwickeln, bauen und verkaufen.

Hier ist politische Steuerung von Investitionen entscheidend.

**Link/Kontakt**

The City of Copenhagen
Technical and Environmental Administration
Traffic Department
www.kk.dk/cityofcyclists
Niels Jensen
niejen@tmf.kk.dk

**Quellen**

https://nationaler-radverkehrsplan.de/ (3.3.2016).

http://www.zukunft-mobilitaet.net/2238/verkehrssicherheit/kopenhagen-radwege-extrabreit-strassenverkehrssicherheit/ (3.3.2016).

http://kk.sites.itera.dk/apps/kk_pub2/pdf/823_Bg65v7UH2t.pdf (3.3.2016).

### 2.3.3 Mobilcard Krenglbach (inkl. eCar-Sharing)

Mit der Mobilcard Krenglbach werden die Teilsystem Verkehr, Strom und Kommunikationstechnologie adressiert. Hinter der Mobilcard steckt ein mehrdimensionales Mobilitätskonzept. Mitglieder des gemeinnützig organisierten Vereins können mit ihrer Mobilcard zum einen das „Kraxi“ – ein halbstündig im gesamten Gemeinderaum verkehrendes Sammeltaxi – nutzen. Zudem können, nach dem Prinzip des Carsharings, zwei Elektroautos ganzjährig genutzt werden. Hierfür wurde eine zentrale Elektro-Tankstelle eingerichtet, die auch Nicht-Mitglieder nutzen können.

#### a. Beschreibung Mobilcard Krenglbach

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Mit dem Sammeltaxi wird ein den räumlichen Bedingungen angepasstes Mobilitätskonzept eingerichtet, mit dem die Mobilität im ländlichen Raum verbessert werden soll. Der ÖPNV wird durch das System ergänzt, indem der „letzte Kilometer“ adressiert wird. Somit wird auf die wechselnde Nachfrage in ländlichen Räumen reagiert. Genauso funktioniert auch das Car-Sharing System. Durch die Elektromobilität wird $CO_2$ eingespart und eine zukunftsfähige Technologie eingerichtet, die wichtiger Bestandteil einer umfassenden Umrüstung im Sektor Mobilität ist.

**Technischer Ansatz**

Mikro-ÖV-Systeme (kleine öffentliche Verkehrssysteme) sind spezifische und individuelle Lösungen, die den Menschen in ländlichen Regionen eine Ergänzung zum öffentlichen Personennahverkehr bieten und so eine umweltschonende Mobilitätslösung ohne eigenes Auto ermöglichen.

Die Mobilcard ist so programmiert, dass sie auch als Schlüssel für die Autos fungiert. Sie zeichnet anonymisiert abrechnungsspezifische Daten wie Fahrdauer und Distanz auf. Einmal im Quartal erhalten die Car-Sharer der Gemeinde automatisiert eine Rechnung anhand der erfassten Fahrten und der angefallene Betrag wird daraufhin vom Konto der Autofahrer abgebucht.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Ziel ist es den „Mobilitätsverein" in der Gemeinde zu verankern und so ein Umdenken im Mobilitätsverhalten anzuregen. Durch das „Kraxi" soll vor allem auch das Ortszentrum wieder belebt und die Verkehrssituation verbessert werden.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

Das Pilotprojekt wird drei Jahre lang von Klima- und Energiefonds sowie vom Land Oberösterreich unterstützt.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Krenglbach ist eine österreichische Landgemeinde in Oberösterreich mit ca. 3.000 Einwohnern und somit sehr ländlich geprägt.

**Innovationsgehalt/-kern**

Zentraler Aspekt bei der Mobilcard Krenglbach ist es ein gemeinschaftliches und gemeinnütziges Mobilitätskonzept für ländliche Regionen zu entwickeln, dass durch alternative Kraftstoffe zudem klimafreundlich ist.[118]

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Verein Mobilcard Krenglbach

- Initiator: Norbert und Gerhard Rainer vom „IKU – Verein für Kommunalforschung und Umweltbildung"
- Zielgruppen/Adressat: Bewohner der Gemeinde Krenglbach

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Das Konzept erweist sich als sehr erfolgreich. Nach zwei Jahren wurden mit dem Kraxi über 9000 Personen transportiert und mehr als 13 Tonnen $CO_2$ eingespart. Mit den eSharing-Fahrzeugen wurden mehr als 50.000 km zurückgelegt.

### b. Bewertung Mobilcard Krenglbach

**Ressourcenleichtigkeit**

Das Mobilitätskonzept in Krenglbach reduziert den Verbrauch fossiler Energieträger, da die Koordinierung der Fahrten zu einer Verminderung des privaten PKW-Gebrauchs führt. So werden Ressour-

118 Die E-Fahrzeuge werden mit zudem mit zertifiziertem Ökostrom umweltfreundlich betrieben.

cen effizienter eingesetzt und sogar langfristig der private PKW-Bestand (hier Zweitwagen) abgebaut, sodass auch hier Ressourcenersparnisse möglich sind.

**Demografiefestigkeit**

Das Beispiel ist nicht netzgebunden und sehr individuell einsetzbar, deshalb ist es demografiefest. Aufgrund dieser Flexibilität eignet es sich sowohl für wachsende als auch für schrumpfende Regionen. Allerdings existiert ein Minimum an Auslastungsbedarf des Systems, womit indirekt eine Mindestgröße der Kommune gegeben sein sollte. Dennoch ist das Beispiel der Mobilcard Krenglbach als ein Mobilitätskonzept für schrumpfende Regionen zu betrachten.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Das Konzept bietet sich besonders für ländliche Räume an, in denen der ÖPNV nicht stark ausgeprägt ist.

**Problembewältigungspotenzial**

Die Mobilcard spricht durch das mehrdimensionale Mobilitätskonzept mehrere Probleme zugleich an: Zum einen wird durch die Elektromobilität die Umrüstung auf nachhaltige Energieträger ermöglicht und $CO_2$ eingespart (E-Fahrzeuge nutzen Erneuerbare Energien), zum anderen greift das Konzept auch in sozialer Hinsicht – es regt zum Umdenken an und allokiert die benötigten Ressourcen effizienter.

Es besteht die Gefahr, dass bei einem Vorliegen solcher Systeme der Abbau oder nichtausbau des ÖPNV diskutiert wird, hier müssten lokale Abwägungen getroffen werden.

**Innovationskraft**

Die Mobilcard entfaltet ihre Innovationskraft sowohl in technischer, aber mehr noch in sozialer Hinsicht. Sie unterstützt die Menschen ohne eigenes Auto im ländlichen Raum, mobil zu bleiben. Vor Allem für jüngere und ältere Menschen ohne Führerschein oder jene, die nicht mehr selber fahren wollen, wird die Möglichkeit individueller Mobilität erhöht.

**Infrastruktureller Kontext**

Der Aufbau der zusätzlichen Infrastruktur, nämlich die Anschaffung entsprechender Sammeltaxis und die Einrichtung der Mobilitätskarten sind als dezentrale Infrastrukturmaßnahme anzusehen. Gleichsam ist das Konzept auf das Bestehen der Straßeninfrastruktur angewiesen.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Die Mobilitätoptionen der Bürger im ländlichen Raum erhöhen sich durch dieses System, sodass keine negativen Auswirkungen zu erwarten sind. Mit dem System werden Sozialkontakte erhöht und das Gemeinwesen gestärkt.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Kosten entstehen vor allem zwecks Investition in die Fahrzeuge. Eine ökonomische Tragbarkeit scheint trotz Förderung vorzuliegen und ist vor allem in Relation zu anderen Infrastrukturlösungen deutlich kostengünstiger. Grundsätzlich ist die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme von der Auslastung der Fahrzeuge abhängig.

**Link/Kontakt**

Renée Welsch (Presse), AMV Networks GmbH
Audio Mobil Straße 5, 5282 Ranshofen
fon +43 7722 64 32 50
e-mail renee.welsch@amv-networks.com
http://www.mobilcard.at/

**Quellen**

http://www.klimaaktiv.at/mobilitaet/mobilitaetsmanagem/kommunalregional/krenglbach.html (20.4.2016).

http://www.amv-networks.com/media-relations/pressemitteilungen/Oesterreichweit-einzigartiges-Mobilitaetsprojekt-mit-dem-AMVrSystem_557 (20.04.2016).

https://www.energiebewegung.at/mein-projekt/projekt/mobilcard-krenglbach/#.VfrOiEZ2NLs (20.04.2016).

http://mobilcard.at (20.4.2016).

### 2.3.4 Interurbanes Verkehrsmanagement Stockholm

Mit dem interurbanen Verkehrsmanagement Stockholm werden die Teilsysteme Verkehr sowie IKT adressiert. Stockholm leidet, wie viele andere europäische Städte auch, unter hohem Verkehrsaufkommen und täglichen Staus in der Stadt und den Vororten. Die Stadt richtete daher von 2000 bis 2009 ein interurbanes Verkehrsmanagement ein. In diesem Zuge wurde ein umfassendes, intelligentes Verkehrsnetz errichtet, um die Verkehrsflüsse zu steuern. Ziel der Verbesserung des Verkehrsflusses ist es, Staus und Emissionen zu vermeiden. Dies wird durch eine Vielzahl an technischen Instrumenten ermöglicht, die sowohl bei der Erfassung der Verkehrsdaten, als auch bei deren Analyse und der anschließenden Regulierung des Verkehrs unterstützen.

#### a. Beschreibung Interurbanes Verkehrsmanagement Stockholm

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Durch das System soll im Raum Stockholm der Verkehrsfluss und Verkehrssicherheit verbessert, die Unfallzahlen und Umweltbelastung verringert werden.

**Technischer Ansatz**

Es wurde ein umfassendes technisches System zur Erhebung der Verkehrsdaten installiert, dass auf dem sogenannten MTM-2 Standard basiert. Es wurden insgesamt 360 MTM-2 Streckenstationen eingerichtet. Zudem sind 1.090 Spursignale, 1.100 Stauwarndetektoren, 1.167 variable Orientierungsschilder in Betrieb. Der Verkehr wird auch an den Tunneleinfahrten mittels Informationszeichen, und Sperrsignalen reguliert. 500 Kamerasysteme dienen der Erfassung stehender Fahrzeuge. Es werden pro Sekunde 250.000 anonymisierte GPS-Daten von Handybesitzern, Stau- und Unfallmeldungen sowie Daten der Sensoren und des Mautsystems analysiert und so der Verkehr gesteuert.

Gekoppelt wird dieses System der Verkehrssteuerung mit dem monetären Element der City-Maut. Diese wurde in Stockholm 2007 eingeführt und besteht aus einem sogenannten „Kordonsystem“, d. h. einem Ring von Kontrollstellen an den Zufahrtsstraßen (Gebührenring). Für die Autofahrt ins Zentrum wird eine Gebühr erhoben. Die Erfassung der Autofahrer wird elektronisch vorgenommen und die Gebühren per monatlicher Rechnung oder automatischer Kontoabbuchung verrechnet. Da es Ziel ist die Nachfrage so zu steuern, dass Staus vermieden werden, sind die Gebühren entsprechend strukturiert.

### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Ziel ist es, Staus zu vermeiden, indem der Verkehrsfluss verbessert wird, die Verkehrssicherheit zu erhöhen und Emissionen zu reduzieren. Insgesamt soll die Umwelt- und Lebensqualität in der Stadt zu erhöht werden. Die ebenfalls zum Verkehrskonzept gehörende „Staugebühr“ soll zudem den Umstieg auf den Öffentlichen Nahverkehr anregen.

### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Die Kosten für den Betrieb liegen bei 250 Millionen Kronen. Die Nettoeinnahmen liegen bei 600.000 Kronen pro Jahr. Die Maut ist von der Steuer absetzbar. Das Mautsystem in Stockholm wird vom schwedischen Bundesamt für Verkehr betrieben.

### Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)

Die Stadt Stockholm ist urban geprägt und wachsend.

### Innovationsgehalt/-kern

Das Stockholmer Verkehrsmanagement basiert auf zwei Kernpunkten. Zum einen besteht es aus einem datenbasierten, intelligenten Verkehrsnetz, zum anderen zielt das Maut-System auf eine indirekte Regulierung des Verkehrsaufkommens und dient der Refinanzierung.

### Governance/Steuerungsebene und Akteure

Stadt Stockholm (Verkehrsverwaltung)

- Initiator: Stadt Stockholm, wobei das Unternehmen SWARCO das Konzept entwickelte und die Anlagen installierte. Es ist ebenso für Service, Wartung und Reparaturen verantwortlich.
- Zielgruppen/Adressat: Das Konzept adressiert alle Verkehrsteilnehmer im öffentlichen Raum Stockholms.

### Erzielte Ergebnisse, Erfolge

Das Busnetz in Stockholm wurde vor Einführung der Maut ausgebaut, um etwa ein Umsteigen für Pendler zu erleichtern. Zusätzliche Umsteiger gab es erst nach Einführung der Straßengebühr und nicht schon nach Bereitstellung des zusätzlichen ÖV-Angebotes. Während nach Einführung der Maut die Zahl der Autofahrten in der Stadt um 100.000 am Tag fiel, stieg die Zahl der ÖV-Nutzer um 40.000. Zum Rückgang im Autoverkehr trug neben der Nutzung des ÖPNV und andere Verkehrsträger (beispielsweise Fahrrad, Motorroller) auch eine Vermeidung nicht dringend notwendiger Fahrten bei. Eine andere Routenführung, also klassischen Ausweichverkehr, gab es kaum.

Laut Swarco bewirkt das System eine Verringerung der Unfallzahlen und einen verbesserten Verkehrsfluss. Die individuellen Fahrzeiten konnten laut Swarco um bis zu 50 % verringert werden, die Emissionen um 20 %. Folgende konkreten Erfolge wurden erzielt:

- Reduktion von Folgeunfällen: 46 %
- Reduktion von Unfällen mit schwerwiegenden Folgen: 35 %
- Reduktion von Unfällen insgesamt: 23 %
- Reduktion der Anzahl beteiligter Fahrzeuge: 28 %
- Reduktion der Zahl von Verletzten: 21 %
- Reduktion bei der Reiseverzögerung: 15 %
- Kosten für Straßenerhaltung (Tag): -25 %
- Kosten für Straßenerhaltung (Nacht): -45 %

### b. Bewertung Interurbanes Verkehrsmanagement Stockholm

#### Ressourcenleichtigkeit

In Stockholm wurden mit der optimierten Steuerung unter anderem Verkehrsstaus vermieden und so Ressourcen sowie $CO_2$ eingespart. Jedoch muss eine technische Infrastruktur aufgebaut werden, die ressourcenintensiv ist. Dies betrifft zum einen die Verkehrs- und zum anderen die IKT-Infrastrukturen. Eine Ressourcenleichtigkeit ist wegen des Infrastrukturaufbaus etwa bei IKT eingeschränkt gegeben. Rebound-Effekte können dazu führen, dass sich entgegen einer erwünschten $CO_2$-Reduktion, das Verkehrsaufkommen erhöht, da die optimierten Verkehrsflüsse hierfür einen Anreiz bieten. Die Nutzung der Maut hingegen hat zur Reduzierung der Verkehre beigetragen und führt somit zur Ressourcenleichtigkeit. Gerade die Gebührenstruktur schafft für Pendler einen Anreiz, stärker auf den öffentlichen Verkehr zu setzen. Optimierte Verkehrsflüsse führen andererseits mitunter zu einem geringeren Ausbau der Verkehrsinfrastruktur, was wiederum Ressourcen einspart. Wenn die Einnahmen der Maut für den Ausbau der Straßeninfrastruktur eingesetzt werden, hat es negative Auswirkungen auf die Flächeninanspruchnahme.

#### Demografiefestigkeit

Das System ist – neben der IKT/Kamera–Infrastruktur – nicht netzgebunden. Das Verkehrsmanagementkonzept ist speziell auf die Mobilitätsproblematik in Kommunen abgestimmt, deren Verkehrsaufkommen sehr hoch ist bzw. die Verkehrsinfrastruktur im Missverhältnis zu diesem steht. Die technische Infrastruktur muss bei einem Rückgang der Bevölkerung zurückgebaut werden, wovon in Stockholm derzeit nicht auszugehen ist. Im Falle wachsender Regionen ist das System leicht erweiterbar und somit problemlos zu adaptieren.

#### Räumliche Übertragbarkeit

Das intelligente Verkehrssystem ist für urbane Räume und für stabil bis wachsende Regionen geeignet. Das Konzept reagiert auf Problemstellungen, die in urbanen Räumen auftreten. Denn eine Staureduktion hätte in solchen Räumen einen positiven Effekt auf die Lebensqualität (auch durch Verringerung der Fahrzeiten) in denen das Stauaufkommen auch entsprechend hoch ist. Angesichts des aufwändigen Aufbaus an Infrastruktur eignet es sich nicht für schrumpfende Regionen, da ein potenzieller Rückbau aufwändig wäre und zusätzliche Ressourcen und Energie beanspruchen würde. Bei der Übertragbarkeit sollte berücksichtigt werden, dass eine stärkere Verlagerung des Verkehrs auf alternative Systeme (u.a. ÖPNV, Fahrrad, Park+Ride) ressourcenleichter wäre – auch in Bezug auf Flächen. Weshalb die Mautgebühren als Teil des Konzepts zur Verlagerung des Verkehrs ein wichtiges Instrument sind.

#### Problembewältigungspotenzial

Das Verkehrsmanagement sorgt für weniger Unfälle und weniger Emissionen. Letzteres muss in Relation zu Kosten und Ressourcenbedarf der Maßnahmen betrachtet werden. Dass die Reduktion von Emissionen auf eine Optimierung der Verkehrsflüsse ausgerichtet ist, macht das Konzept fragil. Die Gebührenstruktur schafft jedoch für Pendler einen Anreiz, stärker auf den öffentlichen Verkehr zu setzen.

Eine alleinige Optimierung der Verkehrsflüsse (ohne Mautsystem) könnte langfristig die Attraktivität von Motorisiertem Individualverkehr wieder erhöhen: Fließt der Verkehr besser, so motiviert dies eher zur Nutzung des MIV's. Deshalb ist die Kombination mit der Einführung eines Gebührensystems unablässig. In Stockholm konnte der Verkehr auch durch den Ausbau von ÖPNV und Fahrradinfrastruktur zunächst nicht umfassend reduziert werden. Erst durch die Einführung der Maut gingen die Zahlen des MIV in Stockholm zurück. Deshalb greift ein allein auf die Optimierung des Verkehrsfluss abgestelltes Konzept zu kurz. Die planungstheoretischen Untersuchungen zur autogerechten Stadt

zeigen, dass eine Ausweitung, Verbesserung der Straßenverkehrsinfrastruktur stets zu einer Erhöhung der Nutzung führt, sodass man hier in alten Pfadabhängigkeiten verhaftet bleibt.

Alternativ könnten steuernde Maßnahmen ausgeweitet werden, etwa um die ÖPNV-Nutzung zu fördern. Eventuell könnte statt – oder im Rahmen – des Mautsystems der Erwerb von ÖPNV-Jahreskarten obligatorisch sein. Oder wie in London, wo die Einnahmen der Maut vor allem für den ÖPNV eingesetzt werden. In London wird das Stadtmautsystem von Transport of London, der Betreiber des ÖPNV ist, organisiert. Hierdurch werden zusätzliche Anreize gesetzt, den ÖPNV oder verschiedene Mobilitätsangebote (z. B. Fahrrad) zu nutzen.

**Innovationskraft**

In technischer Hinsicht ist das Stockholmer Verkehrsnetz als innovativ zu bewerten. Auch die Steuerungsmöglichkeiten über Gebühren sind innovativ. In Stockholm war geplant, die Mautgebühren teilweise zur Refinanzierung des ÖPNV zu nutzen (erste Busse wurden bereits gekauft)[119], doch nach einem Politikwechsel werden die Einnahmen vor allem für den Straßenbau ausgegeben. Erst nach Einführung der Maut reduzierte sich die Zahl der Autofahrten in der Stadt um 100 000 am Tag, gleichzeitig stieg die Zahl der ÖPNV-Nutzer um 40 000. Zum Rückgang im Autoverkehr trug auch die Vermeidung nicht dringend notwendiger Fahrten bei. Dieses Ergebnis zeigt, dass gerade die Maut zu einen umsteigen auf alternative Systeme geführt hat, die alleinige Bereitstellung von ÖPNV hatte nicht zu solchen Ergebnissen geführt. Dies zeigt, dass gerade der Ausbau von ÖPNV/Fahrradinfrastruktur kombiniert mit Gebührenmodellen erfolgreich ist.

**Infrastruktureller Kontext**

Alle Komponenten des Systems werden von einem Computer zentral gesteuert. Somit ist die neu aufgebaute Infrastruktur letztlich ein zentrales System.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Vor allem die umfassende Erhebung von Bewegungsdaten ist strittig. Nach anfänglicher Skepsis gegenüber dem neuen System ist die Zufriedenheit nach der Umsetzung jedoch deutlich gestiegen, da die positiven Effekte sichtbar waren. Bei einer Abstimmung hat sich eine Mehrheit (53 Prozent) in der Stadt Stockholm für die City-Maut ausgesprochen, in den Umlandgemeinden war eine Mehrheit (62 Prozent) dagegen. Insgesamt existieren also weniger Probleme hinsichtlich der sozialen Akzeptanz bei dem vom Verkehr betroffenen Stadtbürger.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Kosten für das System mit IKT und fester Infrastruktur (z. B. Kameras, Detektoren) scheinen bei dem Umfang nicht unerheblich zu sein. Für eine wirtschaftliche Tragfähigkeit ist vor allem die Höhe der City-Maut die zusätzlichen Einnahmen im ÖPNV, geringere Kosten für die Straßenerhaltung entscheidend (siehe oben). Da die City-Maut anpassbar ist, müsste eine ökonomische Tragfähigkeit gegeben sein. In Stockholm betragen die jährlichen Einnahmen aus der Maut etwa 600 Millionen Kronen. Dem stehen Kosten von 250 Millionen Kronen für den Betrieb des Systems gegenüber. Somit ergeben sich Nettoeinnahmen von circa 350 Millionen Kronen pro Jahr. Die Maut ist jedoch von der Steuer absetzbar. Das Mautsystem in Stockholm wird vom schwedischen Bundesamt für Verkehr betrieben. Nicht berücksichtigt sind die Investitionskosten für den Aufbau des Systems.

119 Vor der Versuchsphase wurden 197 Busse gekauft und 14 neue Buslinien geschaffen (insbesondere in weiter entfernte Randgebiete) und die Park-and-Ride Möglichkeiten massiv ausgebaut. Die Reichweite des ÖPNV wurde dadurch um 7 % erhöht und die P&R Kapazität um 29 %. Siehe: http://www.zukunft-mobilitaet.net/12127/analyse/innenstadtmaut-london-mailand-und-stockholm/ (31.08.2016).

Für jene Kommunen, in denen eine mögliche Übertragbarkeit in Frage käme, ist abhängig vom System der Aufbau der IKT-Infrastruktur und gegebenenfalls der ÖPNV-Infrastruktur in jedem Falle ein erheblicher Kostenfaktor, da zumindest anfangs in einen gewissen Grundstock an Infrastruktur investiert werden müsste. Wenn Mauteinnahmen in den ÖPNV fließen, können Investitionen in Straßeninfrastruktur minimiert werden.

**Link/Kontakt**

Per Anders Hedkvist, Verwaltungsdirektor Verkehrsamt Stockholm
fon +46 08-508 26 301
e-mail peranders.hedkvist@stockholm.se
http://www.stockholm.se/-/Kontakt/Kontakta-oss/Presskontakt/Forvaltningsdirektorer-/

**Quellen**

www.swarco.com/de/Referenzen/INTERURBANES-VERKEHRSMANAGEMENT/INTERURBANES-VERKEHRSMANAGEMENT,-Schweden,-Stockholm-Trafikverket-Region-Stockholm (20.04.2016).

www.avenir-suisse.ch/31760/citymaut_stockholm-der-ring/ (20.04.2016).

### 2.3.5 Intermodalitätskarte Stuttgart

Mit der Intermodalitätskarte Stuttgart werden die Teilsysteme Verkehr und IKT adressiert. Die ServiceCard ist ein elektronischer Fahrschein für E-Mobiliät für die Region Stuttgart. Das Projekt verfolgt das Ziel eine möglichst umstandslose Nutzung elektromobiler Dienste im Stuttgarter Verkehrsraum zu ermöglichen. Sie soll durch Kombination mit anderen kommunalen Angeboten eine weitere Verbreitung erfahren. Mit der ServiceCard können die Angebote von Call-a-Bike, Flinkster, Car-2-Go und stadtmobil sowie die EnBW-Ladestationen genutzt werden. In 2015 hat die Service Card den im November 2013 eingeführten Mobilpass ersetzt. In einer ersten Welle können Abonnenten die ServiceCard als elektronischen Fahrschein nutzen. Vermarktet wird die Karte unter dem Begriff Polygo.[120]

#### a. Beschreibung Intermodalitätskarte Stuttgart

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Die ServiceCard ist der Teil eines nutzerfreundlichen Elektromobilitätskonzepts und soll so den Ausbau der Elektromobilität durch erhöhte Akzeptanz beschleunigen.

**Technischer Ansatz**

Die Karte vernetzt die Angebote mehrerer (Elektro-)Mobilitätsanbieter.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Der einheitliche Zugang zu (elektro-)mobilen und städtischen Angeboten soll die Attraktivität der Angebote und die Elektromobilität nachhaltig voranbringen. Die Service Card entwickelt damit die E-Mobilität nicht in technischer Hinsicht, sie fördert die Nutzung von E-Mobilität durch Vernetzung und Zusammenarbeit.

120 Siehe: https://www.mypolygo.de/ (29.08.2016).

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

In den Bewerbungen für das Schaufenster Elektromobilität wurden die Investitionskosten für Stuttgart Services auf etwa 25 Millionen Euro geschätzt. Rund 9,5 Millionen Euro sind durch die Förderzusage des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) abgedeckt.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Die Stadt Stuttgart ist urban geprägt und wachsend. Nach Angaben der Bertelsmann-Stiftung wird Stuttgart bis 2030 um 7 % wachsen.

**Innovationsgehalt/-kern**

Innovationskern ist die multi- und intermodale Informations- und Buchungsplattform zur Förderung der Elektro-Mobilität.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Stuttgarter Straßenbahnen (SSB)

- Initiator: Stuttgarter Straßenbahnen (SSB)
- Zielgruppen/Adressat: Die ServiceCard adressiert die Stuttgarter Bevölkerung sowie Pendler und Touristen.

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Stuttgart Services wurde auf der Hannover Messe mit dem Best Practice Preis Telematik in Kommunen ausgezeichnet.

### b. Bewertung Intermodalitätskarte Stuttgart

**Ressourcenleichtigkeit**

Das eigentliche Projekt adressiert die Ressourceninanspruchnahme vor allem indirekt. Der Nachhaltigkeitsverbund (zu Fuß, Fahrrad, Car- und Bike-Sharing und elektromobiler Individualverkehr) wird gestärkt und Hürden der Intermodalität abgebaut. Durch diese Förderung der Intermodalität ist eine Einsparung fossiler Energieträger und somit Verringerung der THG- und Luftschadstoffemissionen zu erwarten.

**Demografiefestigkeit**

Die Intermodalitätskarte ist nicht netzgebunden und somit als demografiefest einzuschätzen. Sie ist flexibel handhabbar und erweiterbar. So ist die Karte theoretisch in allen Demografietypen anwendbar. Dennoch ist sie in nicht unerheblichem Maße von netzgebundener Infrastruktur abhängig. Entsprechende (Elektro-)mobilitätsangebote teilweise privater Unternehmen müssen in den entsprechenden Kommunen bereits existieren. Möglicherweise rentieren sich solche Systeme in kleinen und schrumpfenden Kommunen nicht oder werden aufgrund ihrer privatwirtschaftlichen Ausrichtung nicht abgedeckt, so könnte der Ansatz der Intermodalitätskarte dort ins Leere laufen.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Die ServiceCard ist vor allem für Mittel- und Großstädte geeignet. Ob in schrumpfende Regionen die Kosten tragbar sind ist fraglich. In allen anderen Raumtypen ist die Infrastruktur, von der das Konzept mittelbar lebt, nicht vorhanden.

### Problembewältigungspotenzial

Die Vereinheitlichung des Zugangs zu verschiedenen Angeboten verringert die Barriere und steigert die Attraktivität der nachhaltigen Mobilitätsangebote. Sie adressiert damit eine wesentliche Problemstellung urbaner Räume. Denn bislang verursacht die mangelnde Kompatibilität der Mobilitätsangebote Transaktionskosten, die dazu führen, dass selten mehr als ein Mobilitätssystem genutzt wird, um entsprechende Wege zu bestreiten. Die intelligente Koppelung und Abstimmung unterschiedlicher Mobilitätsangebote führt zu großen Synergieeffekten und schärft gleichsam das Bewusstsein für den Umgang mit Mobilität. Die Karte ist ein Instrument zum Abbau solcher Hürden und könnte insbesondere Sharing-Angebote und den ÖPNV stärken. Falls es gelingt MIV-Nutzer zum Umsteigen auf alternative Systeme zu bewegen, könnte sie ein wichtiger Baustein für eine nachhaltige Mobilität sein. Problematisch wäre hingegen, wenn bisherige Nutzer von ÖPNV und Fahrrad durch dieses Angebot vermehrt auf MIV umsteigen.

### Innovationskraft

Die Karte selbst entfaltet auf Grund des Pilotstatus und des umfassenden Ansatzes Innovationskraft. Die Vernetzung der verschiedenen Angebote ist als institutionelle Innovation zu betrachten, da sie als Integrationsplattform unterschiedlicher Anbieter fungiert. Diese Vernetzung einer Vielzahl von Akteuren ist innovativ. Die Karte soll vor allem die Nutzung elektromobiler Angebote erleichtern. Gleichsam öffnet der Abbau der Hürden den Mobilitätsdiskurs für breite Teile der Öffentlichkeit, wovon langfristig auch die Kommunen profitieren können. Innovative Lösungen sind in einem solchen Klima leichter zu verwirklichen.

### Infrastruktureller Kontext

Der Infrastrukturelle Kontext ist als zentral einzustufen. Die Mobilitätsangebote werden zwar von vielen verschiedenen Anbietern bereitgestellt, die Karte selbst jedoch wird über einen zentralen Anbieter verwaltet und abgerechnet. Insgesamt führt sie zu einer Dezentralisierung des Mobilitätssektors.

### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Durch die Karte erhöhen sich die Mobilitätoptionen der Bürger und die Abrechnungen werden vereinfacht. Wege können somit absehbar ressourcenleichter, schneller und effizienter bestritten werden. Somit sind keine negativen Auswirkungen hinsichtlich der Akzeptanz zu erwarten.

### Ökonomische Tragfähigkeit

Die Kosten für die ServiceCard waren nicht unerheblich. Es wurden Fördergelder für die Entwicklung eingesetzt. Es ist denkbar, dass entsprechende Systeme nun auch kostengünstiger bereitgestellt werden können. Eine Refinanzierung wäre z. B. über Gebührenmodelle bei entsprechender Nachfrage möglich. Auch könnten verstärkt die privaten und teilprivaten Anbieter beteiligt werden, die letztlich auch von dem Konzept profitieren.

### Link/Kontakt

Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB)
Schockenriedstraße 50, 70565 Stuttgart,
fon 0711 7885-0
e-mail stuttgart-services@mail.ssb-ag.de
https://www.stuttgart-services.de/

### Quellen

https://www.bosch-si.com/de/loesungen/mobility/unsere-loesungen/stuttgart-services.html (10.03.2016).

http://www.ssb-ag.de/Stuttgart-Services-870-0.html (10.03.2016).

http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.elektromobilitaet-in-stuttgart-das-ziel-ist-eine-karte-fuer-alles.1cb3b1d9-5b2b-4353-81df-1f05fa175bd1.html (10.03.2016).

http://www.stuttgart-services.de/projektfortschritt/best-practice-preis-telematik-in-kommunen.html (3.03.2016).

### 2.3.6 Elektro-Bürgerrufauto in Oberreichenbach

Das Elektro-Bürgerrufauto Oberreichenbach adressiert die Teilsysteme Verkehr und Strom. Es funktioniert nach dem Prinzip, dass Bürger auf ehrenamtlicher Basis ein zur Verfügung gestelltes Fahrzeug in der Funktion als Bürgerrufauto betätigen. Mit dem Bürgerrufauto können Fahrten gebündelt und dadurch ein Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden. Hierbei wird ein Elektroauto eingesetzt, das an einer Solartankstelle wieder aufgeladen wird. Dieses Angebot existiert seit 2012.

#### a. Beschreibung Elektro-Bürgerrufauto in Oberreichenbach

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Mit dem Bürgerrufauto wird die Problematik einer (umweltfreundlichen) Mobilitätsgewährleistung im ländlichen Raum angegangen. Durch die Nutzung von Elektrofahrzeugen werden $CO_2$-Emissionen vermieden.

**Technischer Ansatz**

Das Bürgerrufauto verkehrt in der Gemeinde und Umgebung und kann kostengünstig in Anspruch genommen werden. Ist eine angefragte Fahrt auch mit dem ÖPNV möglich, wird auf diese Alternative verwiesen.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Der Impuls kam vom Arbeitskreis „Nahversorgung und Mobilität“, der sich zum Ziel gesetzt hat, in Oberreichenbach und seinen Teilorten zum einen die Benutzung von öffentlichen Verkehrsmitteln attraktiver zu machen, zum anderen den Bürgerinnen und Bürgern eine bessere Mobilität zu ermöglichen.

In erster Linie soll das Bürger-Rufauto eine Hilfe für ältere Menschen und Jugendliche sein. Die Fahrten werden gebündelt. Laut der Vorlage des Gemeinderats erhofft man sich dadurch auch, dass mittelfristig manche Familien in Oberreichenbach auf ein Zweitauto verzichten können und somit ein Beitrag für den Umweltschutz geleistet werden kann.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

Das Fahrzeug wird von der Energie Calw GmbH (ENCW) sowie dem Renault Autohaus Lohre kostenlos zur Verfügung gestellt.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Die Gemeinde Oberreichenbach hat 2.800 Einwohner und liegt im Schwarzwald im Landkreis Calw. Die Bevölkerung des Landkreis Calw ist mit -2,8 % bis 2030 leicht rückläufig (Quelle: Bertelsmann-Stiftung).

**Innovationsgehalt/-kern**

Die Fahrten werden gebündelt und von ehrenamtlichen FahrerInnen mit einem Elektro-Automobil ausgeführt. Rund 50 ehrenamtliche Fahrer stellen sich zur Verfügung. Sie sind zwischen Montag und

Freitag im Zwei-Schicht-Betrieb jeweils zwischen 08:00 Uhr und 13:30 Uhr sowie von 14:30 bis 21:00 Uhr unterwegs.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Partnerschaftliche Kooperation von Kommune bzw. kommunaler Politik, lokalem bzw. regionalem Energieversorger, einem ortsansässigen Unternehmer und dem Engagement der Oberrreichenbacher Bürgerinnen und Bürger

- Initiator: Arbeitskreis Nahversorgung und Mobilität bzw. ENCW
- Zielgruppen/Adressat: Bürger der Gemeinde Oberreichenbach

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Die Gemeinde Oberreichenbach gehört zu den Gewinnern des Bundeswettbewerbs „Kommunaler Klimaschutz 2012“.

### b. Bewertung Elektro-Bürgerrufauto Oberreichenbach

**Ressourcenleichtigkeit**

Das Elektroauto fährt mit Solarstrom, dadurch werden fossile Energieträger eingespart.

**Demografiefestigkeit**

Das Bürgerrufauto ist – abgesehen von der Ladesäule – nicht netzgebunden und flexibel einsetzbar. Das Bürgerrufauto ist für ländliche, vom demografischen Wandel negativ betroffene Regionen sehr gut geeignet (als Ergänzung zu ÖPNV). Es ist aber auch in wachsenden ländlichen Regionen gut einsetzbar. Das System ist vor allem für junge und alte Menschen attraktiv.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Das Bürgerrufauto ist eher im ländlichen Raum sinnvoll. In urbanen Regionen sind andere Sharing-Modelle vorhanden (z. B. free floating).

**Problembewältigungspotenzial**

Adressiert wird hier das Problem der Mobilitätsgewährleistung in ländlichen Regionen auf klima- und umweltschonende Weise. In dieser Hinsicht entfaltet das Beispiel ein hohes Problembewältigungspotenzial, da angesichts des demografischen Wandels die Mobilitätsgewährleistung im ländlichen Raum schwierig ist.

**Innovationskraft**

Das Bürgerrufauto ist vor allem aufgrund des ehrenamtlichen Engagements der Fahrer in sozialer Hinsicht innovativ. Die bedarfsorientierte Koordinierung der Fahrten durch das Konzept ist zudem in institutioneller Hinsicht innovativ. Die Fahrten werden über eine Telefonnummer bei der Stadtverwaltung angemeldet. Das Bürger-Rufauto hat vormittags ungefähr doppelt so viele Passagiere wie an den Nachmittagen. Normalerweise sind Fahrten mit privaten PKWs nicht ausgelastet. Selbst im Falle von Sharing-Modellen ist das Verhältnis von eigentlicher Kapazität und tatsächlicher Auslastung unbefriedigend. In dieser Hinsicht ist das Bürgerrufauto mitunter effizienter als es Car-Sharing Modell in urbanen Räumen sind.

**Infrastruktureller Kontext**

Der infrastrukturelle Kontext ist dezentral, da das Fahrzeug flexibel und nicht netzgebunden einsetzbar ist.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Es ist von einer hohen sozialen Akzeptanz auszugehen, da keinerlei negative Auswirkungen für die Bürger zu erwarten sind – eher im Gegenteil: Das Bürgerrufauto reagiert auf den tendenziellen Abbau des ÖPNV im ländlichen Raum und steigert so die Mobilität der Bürger.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Investitionskosten sind überschaubar und von den Kommunen zu leisten. Zusätzlich reduzieren sich die Kosten durch das bürgerliche Engagement. Bei dem Modell scheint eine ökonomische Tragfähigkeit gegeben zu sein.

**Link/Kontakt**

Arbeitskreis Nahversorgung und Mobilität, Projekt Lebensqualität durch Nähe
75394 Oberreichenbach
k.kistner@oberreichenbach.de

**Quellen**

http://www.oberreichenbach.de/index.php?option=com_content&task=view&id=547&Itemid=119 (3.03.2016).

http://www.schwarzwaelder-bote.de/inhalt.oberreichenbach-buergerrufauto-faehrt-mit-sonnenenergie.34af0061-c2ee-4247-ae65-5d1aaa9bc3fe.html (3.03.2016).

http://www.lqn-leader.de/index.php?id=346 (2.03.2016).

### 2.3.6 StreetScooter in Bonn – $CO_2$-Freie Zustellung durch DP/DHL

Die in diesem Best-Practice-Beispiel aufgeführten adressierten Teilsysteme sind der (Liefer-)Verkehr und Strom. Mit dem StreetScooter hat die Deutsche Post DHL ein eigenes zukunftsweisendes Elektroauto speziell für die Brief- und Paketzustellung entwickeln lassen. Nachdem der erste Prototyp in 2012 in verschiedenen Workshops getestet worden war und sich in puncto Ausstattung, Ladekapazität und Sicherheitsstandards als geeignet erwiesen hatte, wurden ab Mitte 2013 insgesamt 50 Vorserienfahrzeuge in verschiedenen Zustellstützpunkten bundesweit im Betrieb eingesetzt. Dabei werden Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit geprüft. Der Praxistest ist erfolgreich verlaufen, weshalb in 2015 die Serienproduktion des Work und der Komponenten angelaufen ist.

#### a. Beschreibung StreetScooter in Bonn

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Mit dem StreetScooter wird durch die Optimierung des Wirtschaftsverkehrs auf eine Einsparung von fossilen Kraftstoffen, Reduktion von Umweltbelastungen, einschließlich Lärm abgezielt.

**Technischer Ansatz**

Der StreetScooter ist ein neues Elektro-Zustellfahrzeug, das speziell für die Post entwickelt wurde. Mit dem Fahrzeug soll eine neue Ära der Verbund-Zustellung beginnen. Das Unternehmen wurde 2010 an der RWTH Aachen aus der Idee gegründet, Elektromobilität bereits ab kleinen Stückzahlen wirtschaftlich attraktiv zu gestalten – und somit Ökonomie und Ökologie miteinander zu verbinden. Im Mittelpunkt des Ansatzes stehen die Halbierung der Entwicklungszeit, die Reduzierung der Kosten um bis zu

90 % sowie eine modulare Fahrzeugarchitektur. Darauf basierend wurde ein auf die individuellen Bedürfnisse der Deutsche Post DHL Group ausgelegtes Elektrofahrzeug entwickelt – der „Work“. Die maximale Reichweite des Work-Fahrzeugs liegt bei 80 Kilometern im Postalltag. Elektrofahrzeuge eignen sich insbesondere für Fahrten mit ausgeprägtem Start-Stopp-Verkehr. Die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen macht die Tests und den Einsatz von Fahrzeugen mit Elektro-Antrieben zu einer zukunftsweisenden Investition, die wichtige Ergebnisse für eine flächendeckende Produktion liefern können. In Bonn sind die postalischen Zustellstützpunkte und Zustellbasen bereits voll elektrifiziert. Ein wichtiger Schritt, denn so kann der Logistik-Konzern die elektrische Großflotte im Betrieb auf Herz und Nieren prüfen und die Voraussetzungen für einen Roll-out auf andere Städte klären. Maßgeschneidert auf die Bedürfnisse der Verbundzustellung wurde im Rahmen des Projektes der StreetScooter entwickelt. 21 Modelle des StreetScooter fahren bereits auf den Bonner Straßen. Weitere 350 sollen noch 2015 deutschlandweit dazukommen.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Der Umstieg auf Elektrofahrzeuge ist auch Teil einer strategischen Aufstellung der Deutschen Post DHL Group für die Zukunft. Die schärferen Zufahrtsbeschränkungen von Stadtzentren durch Regelung maximaler Feinstaubelastung o.Ä. betreffen Elektromobile nicht. Zugleich macht sich der Konzern ein stückweit unabhängig von der Preisentwicklung auf dem Kraftstoffmarkt.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

Unterstützt wird das Projekt vom Förderprogramm Elektromobilität der Bundesregierung.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Bonn ist urban geprägt und eine wachsende Stadt. Nach Angaben der Bertelsmann-Stiftung ist ein Bevölkerungszuwachs von 7,2 % bis 2030 zu erwarten.

**Innovationsgehalt/-kern**

Die Entwicklung eines Elektroautomobils speziell für die Brief- und Paketzustellung ist Kern des Projektes. Durch die fast vollständige Emissionsfreiheit von Schadstoffen und Lärm sind die Autos umweltfreundlich. Das Pilotprojekt in Bonn sieht vor, bis 2016 die Zahl auf 141 Elektrofahrzeuge zu erhöhen, die dann pro Jahr über 500 Tonnen $CO_2$ einsparen werden.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Deutsche Post DHL, StreetScooter GmbH (Hersteller wurde von der Deutschen Post DHL Group 2014 übernommen) und Institute der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

- Initiator: Gegründet wurde StreetScooter an der RWTH in Aachen. Das Projekt wurde von der Deutsche Post DHL gestartet.
- Zielgruppen/Adressat: Lieferdienste (zunächst speziell DHL)

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

DHL hat bereits zahlreiche Auszeichnungen in den Bereichen Elektromobilität, Klimaschutz/-Umweltfreundlichkeit und Innovation erhalten. Mittlerweile ist der StreetScooter serienreif und wird auch an Privatkunden verkauft.

### b. Bewertung StreetScooter in Bonn

#### Ressourcenleichtigkeit

Die Umstellung der Postzulieferung auf solche speziellen StreetScooter führt zu einer geringeren Belastung der Verkehrsinfrastruktur, sodass ein reduzierter Bedarf an Instandhaltung zu erwarten ist. Zudem führt der Einsatz der Elektromobilität zu einer Reduzierung des Bedarfs an fossilen Energieträger (Nutzung Erneuerbarer Energieträger) und somit auch zu einer Verringerung von THG-Emissionen bei Nutzung von Ökostrom. Die Fahrzeuge sind darüber hinaus so konstruiert, dass sie gemäß ihrer Warentransportfunktion am energieeffizientesten betrieben werden können. So wird insgesamt der Energieverbrauch optimiert. Die Wartungsaufwände bei Elektromobilen sind generell geringer als bei herkömmlichen Fahrzeugen.

#### Demografiefestigkeit

Der StreetScooter ist – ausgenommen von der Ladeinfrastruktur – nicht netzungebunden, womit eine Demografiefestigkeit gegeben ist. In schrumpfenden Regionen könnte das System auf Grund der Reichweite von 80 km an Grenzen stoßen. Für wachsende Regionen ist hingegen das System erweiterbar. Für die Bewältigung eines wachsenden Bedarfs an Logistikinfrastruktur eignet es sich in Relation zu herkömmlichen System eher in wachsenden Gebieten.

#### Räumliche Übertragbarkeit

Das System ist wegen der beschränkten Reichweite für urbane oder suburbane Regionen geeignet. Vor allem vor dem Hintergrund der häufigen Start/Stopp-Vorgänge ist die Elektromobilität gut geeignet. Für den Einsatz in ländlichen Räumen müsste die Reichweite (80 km) der Fahrzeuge erhöht werden.

#### Problembewältigungspotenzial

Das Projekt weist ein hohes Problembewältigungspotenzial im Rahmen der Reduktion von Umweltbelastungen (u.a. Luftschadstoff-, THG-Emissionen Lärm) auf. Da aufgrund von E-Commerce ein zusätzlicher Bedarf an Logistikinfrastruktur erwartet wird, adressiert der StreetScooter vielversprechend eine zukünftig bedeutsame Problemstellung.

#### Innovationskraft

Das Projekt ist innovativ, da es für einen speziellen Wirtschaftszweig im Bereich der Mobilität –„letzte Meile“ – einen effizienteren Ressourceneinsatz verspricht. Aufgrund der internationalen Bedeutsamkeit der Marke DHL kann die Innovation auch soziales Veränderungspotenzial im Sinne einer Vorbildwirkung entfalten. Geeignet ist das System auch für kommunale Einrichtungen bzw. den kommunalen Flottenpark. Hervorzuheben ist ebenso die innovative Zusammenarbeit von drei Parteien: Wirtschaft, Wissenschaft und Kommune.

#### Infrastruktureller Kontext

Abgesehen von der Ladeinfrastruktur ist der Fuhrpark als dezentrale Infrastruktur einzustufen.

#### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Der Einsatz von Fahrzeugen mit Elektroantrieb in Unternehmensflotten spiegelt das gestiegene Umweltbewusstsein. Da die Bürger nicht selbst mit der Umstellung betroffen sind, sind keine Probleme hinsichtlich der sozialen Akzeptanz auszumachen.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Unterstützung erhielt das Projekt durch Fördergelder. Jedoch wurde die ursprüngliche Entwicklungsfirma im Nachhinein von DHL aufgekauft, sodass hier ein zukunftsfähiger Markt zu vermuten ist.

**Link/Kontakt**

StreetScooter GmbH
Jülicher Straße 191, 52070 Aachen
fon 241 9900 23-0
e-mail info@streetscooter.eu

**Quellen**

http://www.dpdhl.com/de/presse/veranstaltungen/co2freie_zustellfahrzeuge.html (31.08.2016).

https://www.bonn.de/rat_verwaltung_buergerdienste/presseportal/pressemitteilungen/22374/index.html?lang=de (7.04.2016).

http://www.streetscooter.eu/ueber-uns (7.4.2016).

https://adacemobility.wordpress.com/2014/12/10/post-kauft-streetscooter-pakete-per-e-auto/ (10.04.2016).

## 2.4 BPB im Cluster Integrierte Planung/Ressourcen

### 2.4.1 Umsetzung des eco-cycle-models am Beispiel Hammarby-Sjöstad in Stockholm

In diesem BPB werden die Teilsysteme Strom, Wärme, Abfall und Wasser adressiert. Es zeigt wie mit integrierten Stadtplanungsansätzen verschiedene Infrastruktursysteme verknüpft und optimiert werden können. Bereits im Kontext von Schwedens Bewerbung um die Olympischen Spiele 1994 sollte auf der Industriebrache Hammarby ein nachhaltiges olympisches Dorf entstehen. Die Ziele wurden beibehalten und ein nachhaltiger neuer Stadtteil mit 11 000 Wohnungen für 25 000 Menschen sowie Läden und Bürogebäuden entwickelt. Hintergrund war die Entwicklung des „Hammarby eco-cycle model“. Mit dem Hammarby-Modell wurde ein eigenes Öko-Kreislauf-Modell (eco-cycle model) mit einem integrierten Konzept für Energie, Abfall und Wasser entwickelt. Ziel war es, ein Wohnumfeld auf Basis nachhaltiger Ressourcennutzung zu schaffen, wo Energieverbrauch und Abfallaufkommen minimiert werden, bei gleichzeitiger Maximierung von Recycling. Die normalerweise in unterschiedlichen Phasen des Projekts beteiligten Akteure (z. B. Entwickler und Stadtwerke) wurden bereits vor Beginn der Planung vernetzt und vorab ein gemeinsames Konzept erstellt. Die hochgesteckten Umweltziele sollen vor allem durch Planung, Infrastruktur und Bauvorgaben erreicht werden und nur zu einem untergeordneten Teil vom Verhalten der Bewohner abhängig sein. Im neuen Entwicklungsgebiet Royal Seaport wird das modifizierte eco-cycle model 2.0 umgesetzt, bei dem auch die Infrastrukturen „Energie“, „Wasser“ und „Materialien“ im Vordergrund stehen.

#### a. Beschreibung eco-cycle Model Hammarby Sjöstad

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

In der Stadt- und Regionalplanung spielten in der Vergangenheit Aspekte einer ressourceneffizienten Infrastruktur oder der Kreislaufgedanke nur eine untergeordnete Rolle. Jedoch liegen hier in den frühen Planungsphasen große Potenziale die durch eine integrierte Planung genutzt werden können.

Mit dem hier vorgestellten Ansatz der integrierten Stadtplanung kann eine Reduzierung des Ressourcenverbrauchs indiziert werden (Reduzierung des Energieverbrauchs, Reduzierung Verkehrsaufkommen, Abfallreduktion).

### Technischer Ansatz

Das Hammarby Modell beinhaltet die Stoffströme: Energie, Wasser und Materialien/Abfall. Während die Wärme,- Strom- und Wasserinfrastruktur weitestgehend an die bestehende Infrastruktur anknüpft, konnte insbesondere im Bereich Mobilität durch die Etablierung eines effektiven ÖPNV-Systems und eines Car-Sharing Angebots der Modal-Split zugunsten einer $CO_2$-armen Mobilität beeinflusst werden (vgl. Foletta 2010:43).

Die Abfallverwertung wurde durch die Einrichtung eines Vakuumsystems zur Sammlung der getrennten Abfälle optimiert. Hammarby soll in absehbarer Zeit zu 50 Prozent mit dem täglichen Abfall der eigenen Bewohner heizen, den restlichen Bedarf decken Abfall aus dem übrigen Stockholm und aufbereitetes Abwasser. Neben jedem Haus befinden sich drei Luken: zwei für den Hausmüll und eine für den Biomüll, die mit einem Schlüssel geöffnet werden muss. Zweimal täglich wird der dort entsorgte Abfall durch ein Vakuum mit 70 Stundenkilometern in einer Pipeline zu einer Sammelstelle am Stadtrand gesogen. Der Restmüll wird in einer Anlage verbrannt, wobei Wärme und Strom produziert und in Hammarby genutzt wird. Auch der Biomüll wird durch eine Pipeline abgesogen und in einer Aufbereitungsanlage entweder zu Dünger verarbeitet oder - zusammen mit dem städtischen Abwasser - zu Biogas umgewandelt. Die Kompostierung des organischen Abfalls und die organischen Reststoffe aus der Kläranlage werden zum Anbau von Energiepflanzen für das BHKW verwendet, welches wiederum Wärme und Strom für das Quartier liefert. Papier, Glas und Metalle werden recycelt. In jedem Wohnblock stehen Räume zur Verfügung zur Abgabe von Elektroschrott und Sperrmüll.

80 % der Wege in Hammarby Sjöstad sollen mit dem öffentlichen Verkehr, zu Fuß oder mit dem Rad erledigt werden. Das Verkehrskonzept sieht vor, schnelle und attraktive öffentliche Verkehrsmittel mit Carsharing und gut ausgebauten Radwegen zu kombinieren. Die Stadtbahn „Tvärbanan“ und mehrere Fähranbindungen binden Hammarby Sjöstad an benachbarte Stadtteile an. Im Straßenraum und in den Garagen stehen 0,7 Parkplätze pro Wohneinheit zur Verfügung.

Regenwasser von Straßen wird lokal gereinigt (u.a. Pflanzenkläranlagen) und nicht in die Kanalisation sondern sauber in die Bucht eingeleitet – keine Infrastrukturnutzung. Das Regenwasser von Dächern und Hinterhöfen wird direkt in die angrenzende Bucht/See geleitet. Das Abwasser wird über ein Kanalnetz zur Kläranlage geleitet. Das gereinigte Wasser dient der Kühlung eines Kraftwerks. Organische Bestandteile werden energetisch verwertet und für Fernwärme und Kühlung benutzt. Biogas wird als Antrieb für ÖPNV-Busse eingesetzt und in Wohnungen genutzt. Damit betreibt Stockholm 300 Busse der Verkehrsbetriebe und in Hammarby im Moment mehr als 1.000 Gasherde. Reste werden als Dünger genutzt.

### Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)

Die Nachhaltigkeit und nicht die bauliche Situation waren der Anstoß für Hammarby Sjöstad. Bis 2017 sollen Strom- und Wasserverbrauch halbiert werden (Letzterer wurde bereits von 200 Litern pro Kopf auf 150 gesenkt). Dieses Ziel sollte möglichst kostengünstig erreicht werden.

### Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten

Die Kosten von Hammarby Sjöstad werden mit 15-20 Mio. Kronen beziffert. Die Mehrkosten für Spezialausgaben, um eine möglichst nachhaltige Stadt zu bauen, lagen in Hammarby Sjöstad bei vier Prozent. Das Projekt Hammarby Sjöstad wurde im Zeitraum 1998–2004 mit über 600 Mio. Kronen durch das nationale Local Investment Programme (LIP) gefördert. Das Local Investment Programm wurde Mitte der 1990er Jahre ins Leben gerufen, um Kommunen dabei zu fördern, radikale Veränderungen für eine verbesserte Umweltleistung ihrer Infrastruktur umzusetzen. Kommunen konnten sich um die Förderung bewerben, wenn sie Maßnahmen einleiteten, die

- darauf zielten, die Umweltbelastung zu reduzieren,

- die Energie- und Ressourceneffizienz erhöhten,
- die Nutzung erneuerbarer Rohstoffe förderten,
- dazu beitrugen, die biologische Vielfalt und Umweltbewusstsein zu erhalten,
- zu einem verbesserten „eco-cycle“ von Pflanzennährstoffen führten,
- die Innenraum-Umwelt hinsichtlich allergischer Substanzen verbesserten.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)**

Die Stadt Stockholm ist urban geprägt und stark wachsend. Den Prognosen nach wird sie bis 2030 um >10 % wachsen.

**Innovationsgehalt/-kern**

Schaffung eines Öko-Kreislauf-Modells mit einem integrierten Konzept für Energie, Abfall und Wasser zur Errichtung eines Wohnumfeldes auf Basis nachhaltiger Ressourcennutzung. Das eco-cycle-model wurde vom Stadtplanungsamt entwickelt.

Der innovative Planungsprozess umfasste 3 Schritte: 1. Entwicklung eines strategischen Plans, 2. Wettbewerb zwischen Entwicklern und 3. Kooperation zwischen Akteuren. Die Kooperation wird als Erfolgsfaktor angesehen. In dem Prozess trafen sich Vertreter der Stadt, Entwickler, Projektorganisation monatlich, um die wichtigsten Punkte zu diskutieren. Firmen (kommunal/privat) zur Bereitstellung der Infrastruktur waren eingebunden (Wasser, Abfall und Energie). Der Prozess lief parallel zum „normalen“ Planungsprozess.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Stadt Stockholm (siehe oben), private Entwickler, private und kommunale Dienstleister, KTH (Universität).

- Initiator: Stadt Stockholm
- Zielgruppen/Adressat: Bevölkerung

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Baulich weitestgehend umgesetzt.

### b. Bewertung eco-cycle Model Hammarby Sjöstad

**Ressourcenleichtigkeit**

Der integrierte Planungsansatz führte zu einer Optimierung der Stoffströme von u.a. Abfall, Energie, Abwasser. Ressourcen werden in Hammarby in großem Umfang eingespart.

Trennung verschiedener Abfälle vor Ort durch Vakuumtransportsystem. Der Abfalltransport über Vakuumsystem substituiert die Abholung vor Ort mit Müllfahrzeug, wodurch Energie eingespart. Zusätzlich erfolgt eine energetische Nutzung des Hausmülls – Biogene Materialien werden hierbei verwendet, um Biogas herzustellen, das wiederum zum Betrieb des ÖPNV eingesetzt wird. Die Planung sieht vor, bis 2017 eine Halbierung des Strom- und Wasserverbrauchs zu erreichen.

80 % der Wege in Hammarby Sjöstad sollen mit dem öffentlichen Verkehr, zu Fuß oder mit dem Rad erledigt werden, wodurch die Belastung der Verkehrsinfrastruktur gering ist und Instandhaltungsaufwand reduziert wird. Das Quartier ist an die ÖPNV (Straßenbahn) angeschlossen.

Durch das integrierte Modell wurde ein gewisser grad der Selbstversorgung und auch Ressourceneinsparungen erreicht, im Stadtteil liegt der Versorgungsgrad bei 24 % der Quartierskälteversorgung und

bei 22 % der Wärmeversorgung sowie bei 5 % des benötigten Stroms. In einer Dissertation[121] wird aufgezeigt, dass durch die Integration bestehender Infrastruktursysteme die Einführung innovativer neuer Systeme teilweise gehemmt und nur gefördert wurden, sofern sie mit dem dominanten System kompatibel waren. Durch die Nutzung des Nahwärmenetzes aus der nahgelegenen Müllverbrennungsanlage wurden zudem Pfadabhängigkeiten geschaffen, die eventuell die Anstrengungen im Bereich der Abfallvermeidung und den Übergang zu erneuerbaren Energieträgern behindern.

Der Stadtteil wurde auf einer Brachfläche entwickelt und ist somit ein gutes Beispiel für das Flächenrecycling.

**Demografiefestigkeit**

Im untersuchten BPB sind unterschiedliche Infrastruktursysteme integriert, von denen manche netzgebunden und andere netzungebunden sind. Im Bereich der Mobilität sind vor allem die Car-Sharingsysteme sehr flexibel. Die Fahrtfrequenz der Straßenbahn könnte bei einer Änderung der Bevölkerungszahlen nach oben oder unten angepasst werden. Die Abfallsammelsysteme nutzen für drei Stoffströme (siehe oben) eine unterirdische fest installierte Vakuumrohrinfrastruktur, die unflexibel ist. Jedoch können bei rückläufigem Abfallaufkommen, die turnusmäßigen Leerungen reduziert werden. Die anderen Sammelsysteme für Stoffströme können flexibel angepasst werden. Die Fernwärme basiert vor allem aus Energie aus der Abfallverbrennungsanlage, in der Abfall aus Hammarby und anderen Stadtteilen verwertet wird. Im Falle eines deutlichen Rückgangs von energetisch verwertbaren Abfällen müssen andere Energieträger genutzt werden.

Die Planer hatten für das Gebiet den Rückzug von alten Menschen in die Stadt gerechnet. In der Realität sind vor allem junge Familien in den neuen zentrumsnahen Stadtteil gezogen.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Das Hammarby-Sjöstad Modell ist besonders für Quartiersentwicklungen und Neubaugebieten in urbanen und suburbanen Raum geeignet, da hier die entsprechend benötigten Auslastungen der Systeme gesichert sind, insbesondere der Abfallkreislauf sowie die Mobilitätskonzepte.

**Problembewältigungspotenzial**

Hier sind große Potenziale für die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs zu sehen. Der integrierte Ansatz der Stadtplanung zeigt auf, wie bereits in einem frühen Planungsstadium das Themenfeld Ressourceneffizienz mitgedacht werden sollte. In Rahmen des eco-cycle-models wurden durch den integrierten Ansatz verschiedene Sektorkopplungen durchgeführt (siehe oben).

**Innovationskraft**

Das BPB entfaltet sowohl technische wie institutionelle Innovationskraft durch die systemische Betrachtung und Verknüpfung der Ressourceninfrastrukturen. Bei dem Stadtteilentwicklungsprojekt war die Entwicklung der Gebäudeinfrastruktur nur ein Element, ebenso wichtig waren eine nachhaltige Infrastruktur (Mobilität, Energie, Wasser, Abfall). Der Planungsprozess, der in Kooperation von Stadtplanern, Vertretern von Stadtwerken, Investoren und Wissenschaft stattfand, ist innovativ. Die Stadtverwaltung war während des gesamten Prozesses bis hin zur Umsetzung ein proaktiver Akteur. Durch Wettbewerbe zwischen 40 Unternehmen gelang es der Stadtverwaltung im Vergleich zu ähnlichen Entwicklungsprojekten einen hohen Standard durchzusetzen.

121 Sofie Pandis (2014): Industrial ecology for sustainable urban development – the case of Hammarby Sjöstad, KHT, Stockholm.

**Infrastruktureller Kontext**

In Hammarby wurde ein integriertes Konzept umgesetzt in dem verschiedene Infrastrukturen adressiert sind. Insgesamt wurden im Projekt sowohl dezentrale, als auch zentrale System eingesetzt. Im Mobilitätssektor ist der Bahnanschluss als zentrales System zu werten. Die weiteren Mobilitätsangebote eher als dezentral. Die Energieversorgung funktioniert teilweise dezentral (z. B. PV, Kälteversorgung), wohingegen die Wärmeversorgung über Fernwärme aus semizentralen Einheiten gespeist wird (z. B. Klärschlamm, Abfallverbrennungsanlage). Abwasser von Straßen wird dezentral aufgereinigt. Abwasser aus den Haushalten wird semizentral einer Kläranlage gereinigt und aus den Reststoffen Biogas produziert.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Es existiert eine große Nachfrage nach den Wohnungen in Hammerby-Sjöstad, was eine hohe soziale Akzeptanz indiziert. Allerdings sind die entstandenen hohen Mieten problematisch und beschränken so den Zugang, was durchaus kritisiert wird.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Mehrkosten werden mit 4 % über den üblichen Entwicklungskosten in Stockholm angegeben, die auch sonst für die Entwicklung einer derartigen Fläche ohne die Umsetzung eines ecocycle-Konzeptes veranschlagt anfallen. So ist die ökonomische Tragfähigkeit in jedem Fall gegeben. Dies zeigt auch die hohe Nachfrage des Wohnraums in Hammerby-Sjöstad.

**Link/Kontakt**

Malin Olsson (Planning Manager and Implementation)
fon +46 (0)8 508 266 54, +46 (0)76 12 26 654
e-mail malin.e.olsson@stockholm.se

**Quellen**

http://bygg.stockholm.se/hammarbysjostad (13.04.2016).

http://greenhattan.ch/wp-content/uploads/2012/09/Scan_14082012_0799_001.pdf (13.04.2016).

https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/studien/pdf/b008206j.pdf (13.04.2016).

### 2.4.2 Nutzung von Biogas zum Antrieb von Müllfahrzeugen der Berliner Stadtreinigung (BSR)

Dieses Best Practice Beispiel adressiert die Teilsysteme Abfall, Strom und Verkehr. Anfang Juni 2013 ging am Standort Ruhleben die neue Biogasanlage der BSR in Betrieb. Hier werden pro Jahr die rund 60.000 Tonnen Bioabfall aus den Berliner Haushalten zu Biogas aufbereitet. Die Anlage arbeitet nach dem Prinzip des Trockenvergärungsverfahrens. Mikroorganismen verstoffwechseln das Biogut, wobei Biogas freigesetzt wird. Das Gas ist nach der Aufbereitung chemisch nahezu identisch mit Erdgas und wird in das Erdgasnetz eingespeist. Dies ist ein Beispiel eines Ressourcenkreislaufs.

#### a. Beschreibung Biogas zum Antrieb von Müllfahrzeugen

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Die Erreichung der Klimaschutzziele ist nur zu schaffen, wenn der Verkehr als einer der größten $CO_2$-Emittenten angegangen wird. Etwa ein Fünftel der jährlichen Treibhausgase in Deutschland entstehen durch den Transport von Menschen und Gütern. Für etwa 95 % der $CO_2$-Emissionen des Verkehrs ist der Straßenverkehr verantwortlich. Neben einer Reduzierung des MIV ist auch die Substitution von fossilen Brennstoffen durch erneuerbare Energien eine Möglichkeit die THG-Emissionen zu reduzie-

ren. Im Bereich des Verkehrs ist – anders als bei Strom und Wärme – der Endenergieverbrauch von 2005 auf 2014 um 1,7 % gestiegen. Ziel bis 2020 ist, diesen um 10 % zu senken. Der Anteil der Biokraftstoffe im Bereich Verkehr liegt bei 5 %.

**Technischer Ansatz**

In einer Biogasanlage der Berliner Stadtreinigung (BSR) werden biogene Abfälle verwertet. In der Vergärungsanlage werden aus Bioabfällen (ca. 60.000 Tonnen Bioabfall) aus der Berliner Bioabfallsammlung Biogas produziert. Technisch wird für das Verfahren eine Trockenvergärung eingesetzt. Produziertes Biogas wird gereinigt, aufbereitet und konzentriert, und besteht zu 98 Prozent aus Methan ($CH_4$) und ist damit chemisch identisch mit Erdgas. Das Biogas hat eine Qualität, mit der es in das Gasnetz der Stadt eingespeist werden kann. Des Weiteren kann dieses Biogas für die Betankung umgerüsteter BSR-Fahrzeuge eingesetzt werden. Auf drei BSR-Betriebshöfen werden an eigenen Gas-Tank-stellen 150 gasbetriebene Müllfahrzeuge aus diesem Netz betankt – etwa die Hälfte der gesamten Müllfahrzeug-Flotte. Dadurch können jährlich rund 2,5 Millionen Liter Diesel eingespart werden.

Die Gärreste (fest und flüssig) der Anlage werden aufbereitet und im Gartenbau und Landwirtschaft eingesetzt. Des Weiteren werden daraus Dünger hergestellt.

Durch den Ersatz von Dieselkraftstoff und die stoffliche Verwertung der Gärreste können insgesamt rund 12.000 Tonnen $CO_2$-Emissionen vermieden werden. Die Verwertung von Bioabfällen trägt daher zum Klimaschutz bei.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Die vormalige BSR-Vorstandsvorsitzende, Frau Gäde-Butzlaff argumentierte wie folgt: „Aus dem Bioabfall der Berliner Haushalte machen wir klimafreundlichen Kraftstoff. Diese Investition zahlt sich ökologisch und ökonomisch aus: Wir tragen zur Reduzierung des Kohlendioxid-Ausstoßes bei und machen uns zugleich unabhängiger von steigenden Kraftstoffpreisen. Damit setzen wir deutschlandweit Maßstäbe für nachhaltiges Wirtschaften“.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

Die Investitionssumme für die BSR-Biogasanlage beträgt insgesamt rund 30 Millionen Euro.

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich, schrumpfend/wachsend)**

Das aufgeführte Beispiel ist in Berlin angesiedelt und somit urban geprägt. Berlin wird nach Prognosen der Bertelsmann-Stiftung bis zum Jahr 2020 um 10,3 % wachsen.

**Innovationsgehalt/-kern**

Kreislauf für biogene Abfälle. Produktion von Biokraftstoff der in eigener Fahrzeugflotte genutzt wird.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR) AöR

- Initiator: Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR) AöR
- Zielgruppen/Adressat: Bürger der Stadt Berlin, Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR) AöR

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Bereits im Frühjahr 2013 startete die erste Testphase einschließlich erster Gaseinspeisung in das Erdgasnetz.

Kenndaten:

| | |
|---|---|
| Rohbiogasproduktion: | 119 $m^3$/t Input mit Ø 62 % $CH_4$ |
| Rohbiogas – Jahresproduktion: | ~ 7.140.000 $m^3$ |
| BioMethan – Produktion: | ~ 4.426.000 $m^3$ |
| Netto-Energieproduktion: | ~ 34 Mio. kWh |
| Dieselsubstitution: | ~ 2,5 Mio. Liter |
| $CO_2$ – Minderungspotenzial: | ~ 6.200 t $CO_2$ (Dieselsubstitut) |
| zzgl. | ~ 6.000 t $CO_2$ (stoffliche Verwertung) |

Nachdem die Anlage 133 Tage in Betrieb war, konnte folgende Bilanz gezogen werden: rund 22.000 Tonnen Bioabfälle wurden verarbeitet, es entstanden rund 6.900 Tonnen feste Gärreste, 9.600 Tonnen flüssiger Dünger und über 600.000 Kubikmeter Biomethan. Mit letzterem könnte man 11 Millionen Kilometer mit dem gasbetriebenen PKW zurücklegen. Über 60 % des Berliner Restabfalls wird mit gasbetriebenen Fahrzeugen der BSR abgeholt.

### b. Bewertung Biogas zum Antrieb von Müllfahrzeugen

#### Ressourcenleichtigkeit

In der Vergangenheit wurden biogene Abfälle kompostiert, wofür zusätzliche Energie aufgewendet werden musste und $CO_2$ emittiert wurde. Durch die Produktion und Nutzung von Biogas in Müllfahrzeugen werden fossile Kraftstoffe für die Abholung von Abfällen eingespart (2.5 Mio. Liter Diesel/a). Das Biogas kann in vorhandene Infrastrukturen für Stadtgas eingespeist werden, für die Leitung und Speicherung müssen keine zusätzlichen Infrastrukturen aufgebaut werden. Die Sammelquoten sollen deutlich auf 100.000 Tonnen/a erhöht werden, weshalb noch bei über 20 % der Bürger Sammelgefäße aufgestellt werden müssen.

Aus den Gärresten wird Dünger hergestellt und somit Ressourcen eingespart, da sie andere Düngemittel substituieren. Da für die Biogasproduktion Bioabfälle eingesetzt werden, werden landwirtschaftliche Flächen nicht für Energiepflanzen nicht in Anspruch genommen.

#### Demografiefestigkeit

Das Infrastruktursystem basiert einerseits auf flexible Einheiten (z. B. Transport der Bioabfälle) und andererseits auf fest installierter Infrastruktur (teilweise vorhanden). Das Gesamtsystem ist abhängig von Anfall von Bioabfällen in einer bestimmten Größenordnung.

Die aufgebaute Infrastruktur der Biogasanlage kann sich nicht kurzfristig an rückläufige Mengen anpassen. In solchen Fällen (z. B. Schrumpfung) müssen andere Substratquellen (z. B. Lebensmittabfälle aus der Industrie) gewonnen oder interkommunale Kooperationen angegangen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass signifikante demografische Effekte in urbanen Strukturen sich i.d.R. in längeren Zeiträumen als die Abschreibung der Anlagen und Nutzungsdauer abspielen.

Die Anpassung des Systems an eine wachsende Bevölkerung erscheint handhabbar. Vor allem Die Abholung der Bioabfälle und die Nutzung des produzierten Biogas scheinen unkritisch. Es ergeben sich mögliche technische/bauliche Änderungen bei der Vergärungsanlage, um die höheren Inputmengen umsetzen zu können. Der Bau von zusätzlichen Anlagen wäre eine andere Möglichkeit.

#### Räumliche Übertragbarkeit

Das Konzept kann in Kommunen aller Raumtypen mit einem entsprechenden Anfall an biogenen Abfällen genutzt werden. Es eignet es sich vor allem für urbane Räume mit entsprechender Substratverfügbarkeit. In ländlichen Räumen könnte eine interkommunale Kooperation hilfreich sein.

**Problembewältigungspotenzial**

Das Beispiel zeigt Lösungen für die Produktion und Nutzung alternativer Kraftstoffe auf. Der Verkehr zählt zu den größten $CO_2$-Emittenten in Deutschland, wobei die Emissionen in den letzten Jahren in diesem Sektor entgegen der Tendenz gestiegen sind. Des Weiteren entstehen bei der Kompostierung Lachgas und Methan, die bei der Biogasaufbereitung geringer sind. Dieses Konzept hat seine Grenzen bei dem biogenen Input, da ein höheres Aufkommen pro Person in diesem Bereich nicht zu erwarten ist. Potenziale werden derzeit jedoch kaum geschöpft, weshalb hier eine deutliche Steigerung möglich ist.

**Innovationskraft**

In dem Beispiel werden mit vorhandenen Technologien nicht erschöpfte Potenziale zur Substitution fossiler Energieträger gehoben. Die Innovation liegt in der Schließung eines Kreislaufs. Es zeigt die Möglichkeiten eines integrierten Ansatzes und Sektorkopplung. Ähnliche Nutzungen sind auch aus Stockholm bekannt. Dort werden alle Busse im ÖPNV mit (Bio)Gas betrieben. Sozial kann das Beispiel zu mehr Engagement bei Bürgern zur Trennung biogener Abfälle führen.

**Infrastruktureller Kontext**

Die Sammlung des Abfalls erfolgt dezentral. Die Aufbereitung des biogenen Materials geschieht jedoch in einer zentralen Anlage. Das produzierte Biogas kann in die vorhandenen Gasnetze und Tankstellen eingespeist werden, die ihrerseits als zentral und dezentral zu kennzeichnen sind.

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Durch das System entstehen keinerlei Nachteile für die Bürger. Die Akzeptanz bei den Bürgern wird gegeben sein. Der Ersatz eines fossilen Kraftstoffs durch einen erneuerbaren kann die Akzeptanz zusätzlich positiv beeinflussen. Emissionen in urbanen Gebieten sind geringer, wovon Bürger profitieren.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

Die Technik für Biogasanlagen ist erprobt und die Kosten mit anderen Anlagen vergleichbar. Ob eine ökonomische Tragfähigkeit in dem Modell gegeben ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab, insbesondere von der Menge des Inputs und der damit verbundenen Effizienz der Anlage.

**Link/Kontakt**

Sabine Thümler (Pressesprecherin)
fon 0171/2272210
e-mail Sabine.Thuemler@BSR.de

**Quellen**

http://www.bsr.de/9495.html (14.04.2016).

http://www.energiezukunft.eu/umwelt/technik/berliner-muellfahrzeuge-tanken-biomethan-gn101284/ (13.04.2016).

### 2.4.3 Der Einsatz von Recycling-Beton durch die Ressourcenstrategie Zürich

Mit der Ressourcenstrategie der Stadt Zürich werden die Teilsysteme Abfall (Baustoffe), Energie, Mobilität adressiert. Im Kontext der Züricher Strategie der „2000-Watt-Gesellschaft“ entwickelte die Fachstelle Nachhaltiges Bauen der Stadt Zürich in Zusammenarbeit mit den Planern projektbezogene Lösungen, die in eine Ressourcenstrategie mündeten. Für Neubauten und Sanierungen bedeutet dies eine aufeinander abgestimmte Optimierung in den Bereichen Energie, Baustoffe, Nutzerfreundlichkeit, Erscheinungsbild und Lebenszykluskosten.

Die „Ressourcenstrategie Zürich“ wurde vom Hochbauamt der Stadt Zürich in Auftrag gegeben und ergab, dass zur Realisierung einer 2000-Watt-Gesellschaft eine Transformation des Gebäudebestandes mit erhöhten Umbauraten in einer Kombination aus Sanierung und Neubau erforderlich sei und dass die dafür benötigten Materialien weitestgehend aus dem Bauwerk der Stadt wiedergewonnen werden müssten. Insbesondere in der Qualitätssicherung und verstärkten Nutzung von Recycling Beton wurde ein hohes Potenzial zur Optimierung von lokalen Ressourcenströmen erkannt.

### a. Beschreibung Recyclingstrategie Zürich

#### Adressierte Probleme und Herausforderung

In der Schweiz wurde auf Bundesebene die Strategie Nachhaltige Entwicklung 2012-2015 erarbeitet, wobei Maßnahmen zum Nachhaltigen Bauen aufgeführt sind. Darin unterstützt der Bund die Gründung eines Netzwerkes Nachhaltiges Bauen Schweiz (NNBS) und des Standards Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS). In der Schweiz werden pro Jahr rund 50 Mio. t mineralische Baustoffe verbaut, wobei gleichzeitig 10 Mio. t mineralische Bauabfälle anfallen. Die anfallenden Bauabfälle werden zu 80 % wiederverwertet, vor allem im Tiefbau. Trotz allem wird von Absatzproblemen gesprochen, die zukünftig verstärkt auftreten könnten. Der Stoffstrom Bauabfälle ist außerordentlich groß, weshalb der Aufbau eines umfassenden Ressourcenmanagements sinnvoll ist.

#### Technischer Ansatz

Die Stadt Zürich entwickelte die Ressourcenstrategie „Bauwerk Stadt Zürich“ (2009) für mineralische Baustoffe, wonach der Anteil von Recyclingbaustoffen wesentlich erhöht werden muss. Der Einsatz in gebundener Form hat Priorität gegenüber dem Einbau in loser Form. Es wurde ebenso formuliert, dass vermehrt Recyclingbaustoffe in allen Anwendungen einzusetzen sind und deshalb die Qualität der Recyclingprodukte weiter zu verbessern ist.

Für die Entwicklung der Ressourcenstrategie wurden Modelle entwickelt, die drei Schritte umfassten:

1. Entwicklung eines statistischen Modells, dass den Istzustand erhebt (2005): Aufbau eines detaillierten Inventars in dem die gelagerten Baumaterialien der Gebäude, Straßen und Infrastrukturanlagen der Stadt Zürich aufgeführt sind. Daraus wurden die Materialflüsse, welche durch die Erneuerung und Neubauten entstehen abgeleitet. Berücksichtigt wurden mineralische Baustoffe und Rückbaumaterialien wie Beton, Mauerwerk, Kies/Sand, Belag und Restfraktion (Gips, Keramik, Glas).

Ergebnisse des ersten Schritts zur Inventarisierung der Stadt wurden folgende Ergebnisse erzielt: In der Stadt Zürich stehen 55.000 Gebäude, mit einem Volumen von 166 Mio. $m^3$. Durchschnittlich sind die Gebäude 66 Jahre alt. Die Mehrfamilienhäuser haben mit 75 Mio. $m^3$ und die Dienstleistungsgebäude mit 64 Mio. $m^3$ einen Anteil von 80 Prozent am Gebäudevolumen. Es wurde zudem festgehalten, dass die Infrastruktur der Stadt hinsichtlich der Materialintensivität häufig unterschätzt wird. So beanspruchen die 800 km Straßen rund 50 Prozent aller Verkehrsflächen, weitere 25 Prozent fallen auf Geh-, Rad- und unbefestigte Wege. Der Schienenverkehr weist mit 14 Prozent nur einen kleinen Anteil auf. Die Infrastrukturnetze weisen eine Gesamtlänge von 5.000 km auf, wobei Abwasser und Wasser jeweils 1.000 km beanspruchen. Die Energieversorgung umfasst ein Netz von 3000 km wovon für die Stromversorgung 2.000 km Leitungen verlegt worden sind. Etwa 1/3 des mineralischen Baustoffvolumens sind in den Gebäuden eingelagert (51 Mio. $m^3$). Gut ¼ des Materiallagers befindet sich in den Infrastrukturanlagen, je etwa zur Hälfte in der Ver- und Entsorgungsnetzen und den Verkehrsbauten. Das Betonlager umfasst rund 1/3 des Volumens, je gut ¼ sind Kies/Sand welcher in loser Form hauptsächlich im Tiefbau gelagert ist, sowie Mauerwerk.

Das Materiallager in 2005 umfasste 100 Mio. t. wobei auf Wohnbauten 37,8 Prozent, Dienstleistungs- und übrige Gebäude 34,7 Prozent und Infrastruktur 27,5 Prozent fallen. Beton macht 31,6 Prozent aus, Mauerwerk 25,9 Prozent, Kies/Sand 26 Prozent und weitere Baustoffe 15,8 Prozent.

2. Simulation der langfristigen Entwicklung in Szenarien bis 2050: Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Materialflüsse und –lager in verschiedenen Szenarien für 1995–2050. Das Ressourcenhaushaltsmodell ermöglicht Rückschlüsse zur grauen Energie, des Energiebedarfs des Gebäudeparks für Raumwärme und Warmwasser.

Die drei Szenarien sind „Konstant“ (konstante Sanierungs- und Rückbauraten), „Sanieren“ (verstärkte Sanierungstätigkeit) und „Ersetzen“ (verstärkter Rückbau). Erfolgt die Bewirtschaftung mit den heutigen Sanierungs- und Rückbauraten nach dem Szenario „Konstant“ werden bis 2050 rund 80 Prozent des Gebäudeparks energetisch saniert sein. Damit lässt sich die 2000 Watt-Gesellschaft nicht erreichen. Die weiteren Szenarien sind vielversprechender, wonach in Zukunft der Gebäudepark beschleunigt erneuert werden, was Sanierungen und Ersatzbauten umfasst. Beim Szenario „Ersetzen“ ist die Materialintensität deutlich größer als beim Szenario „Konstant“.

3. Festlegung von Zielen der Ressourcenstrategie und Maßnahmen: Die in den Schritten 1 und 2 gewonnenen Erkenntnisse führten zur Entwicklung einer umfassenden Strategie. Anhand konkreter Beispiele wird überprüft ob die bereits eingeleiteten Maßnahmen zielführend sind. Zielsetzungen wurden abgeleitet und Maßnahmen aufgeführt.

Übersicht 3: Aufgaben und Maßnahmen der Stadt Zürich zur optimierten Nutzung von RC-Beton

| Aufgaben | Maßnahmen Stadt Zürich |
|---|---|
| Strategie/ Vorgaben für ein optimiertes Ressourcenmanagement | - Masterplan Umwelt<br>- Vorgaben 7 Meilenschritte betreffend Gebäudelabel Minergie-(P)-Eco<br>- Im Genehmigungsverfahren (z. B. UVP einfließen lassen) |
| Städtische Bauvorhaben | - Hochbau: Optimierter Rückbau/Aushub sowie Einsatz von RC-Beton<br>- Tiefbau: Einsatz eines maximalen Anteils an RC-Materialien gemäß Stand der Technik |
| Forschung/ Entwicklung | - Mitwirkung an Studien und Forschungsprojekten<br>- Durchführung von Pilotprojekten im Hochbau (z. B. Schulhaus Birch, Wohnsiedlung Werdwies, Stadion Letzigrund) und im Tiefbau (z. B. Heissmischfundationsschicht) |
| Normen Standards Label | - Anwendung/Praxiserprobung in städtischen Bauprojekten<br>- Mitwirkung in Normenkommissionen und Fachgruppen |
| Aus- und Weiterbildung | - Vorträge und Mitwirkung an Veranstaltungen, Ausbildungsgängen, Weiterbildungskursen usw. |
| Kooperation | - Mitwirkung bei eco-bau |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Der Gebäudepark in der Stadt Zürich stellt ein riesiges Ressourcenlager dar. Dieses gilt es, in der Zukunft auf kluge Weise zu nutzen. Im Jahr 2050 könnte demnach nicht mehr die Kiesgrube, sondern der bestehende Gebäudepark die wichtigste Abbaustätte für mineralische Baustoffe darstellen.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

-

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

Die Stadt Zürich ist mit knapp 400.000 Einwohnern urban geprägt und wachsend.

**Innovationsgehalt/-kern**

Kommunale Ressourcenstrategie, Fokus Neubauten: Optimierung in den Bereichen Energie, Baustoffe, Nutzerfreundlichkeit, Erscheinungsbild und Lebenszykluskosten. Das Engagement von Pionierunternehmen und der Stadt Zürich ermöglichte den Aufbau eines regionalen Markts für RC-Baustoffe im Hochbau.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Stadt Zürich, Hochbauamt, Fachstelle Nachhaltiges Bauen. Erstmalig 2015 wurde das Thema Ressourcen und Rohstoffe im städtischen Umweltplan in einem gesonderten Kapitel behandelt. Dabei wurde dem Handlungsfeld gemeinsam mit den Handlungsfeldern Klimawandel, Luft und Lärm die höchste Priorität eingeräumt. Die Ressourcenstrategie ist Teil der umfassenden Nachhaltigkeitspolitik der Stadt. Sie bildet eine Grundlage für die in den Masterplänen Umwelt und Energie festgelegten Maßnahmen. Die Stadt Zürich übersetzt damit das Ziel der Verringerung des Bedarfs an Primärrohstoffe in konkrete Handlungserfordernisse.

- Initiator: Stadt Zürich
- Zielgruppen/Adressat: Bauherren, Architekten, Bauingenieure, Bausektor

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Umsetzung konkreter Bauvorhaben in der Stadt Zürich mit Einsatz von Recyclingbeton. Zu nennen sind die Schulanlage „Im Birch“ mit einem RC-Anteil von 80 %, Wohnsiedlung „Wohnwies“ mit einem RC-Anteil von 75 %, der Schulanlage „Hirzenach“ mit einem RC-Anteil von 95 %, dem Stadtspital Triemli mit RC-Anteil von 100 %. In der Umsetzung 2016 sind die Wohnsiedlung „Kronenwiese“ und der Neubau des Kunsthauses mit jeweils einem RC-Anteil von 100 %. Zwischen 2007 und 2014 konnte zudem im Kanton Zürich eine Steigerung der Rückbauquoten (total gebundene Rückbaustoffe und total lose verwertet Rückbaustoffe) erzielt werden. Zudem wurde Bewirtschaftungskonzept für den Rückbau entworfen.

**b. Bewertung Recyclingstrategie Zürich**

**Ressourcenleichtigkeit**

Durch die Recyclingstrategie Zürich werden Primärrohstoffe eingespart und lokale Sekundärrohstoffe genutzt. Es besteht in Zürich ein Ansatz zur verpflichtenden Nutzung von RC-Material im Hochbau. Gleichsam ist der Ansatz übertragbar auf die Verkehrsinfrastruktur (jedoch nicht verpflichtend in Zürich).

Das „Bauwerk Stadt Zürich“ dient hier als ein alternatives Lager. Kalkuliert man mit der Annahme eines 50 % Anteils von RC-Beton für die Neuerrichtung von Gebäuden, so könnten 235.000 t Primärrohstoffe durch 95.000 t Recyclingbeton aus dem Materiallager der Stadt und 140.000 t durch Recyclingbeton aus dem Umland ersetzt werden.

Der Einsatz von RC-Beton hat nach Aussagen der Stadt Zürich wenig direkte Einsparungen an $CO_2$-Emissionen zur Folge.[122] Dennoch ist auch hier eine Einsparung zu verbuchen bei einer Transportdistanz von unter 15 km.

So wird auch grundsätzlich durch die verkürzten Transportwege des Sekundärrohstoffes der Verkehr und der Bedarf an fossilen Energieträgern reduziert. Die Gesamtumweltbelastung (Ökologische Knappheit, UBP) wird durch den Einsatz von RC-Beton gegenüber Beton aus natürlicher Gesteinskörnung erheblich reduziert.

**Demografiefestigkeit**

Das Beispiel basiert auf die Nutzung von Baumaterialien der immobilen Bauinfrastruktur. Somit ist das System bedingt demografiefest. Es müssen für RC-Beton sowohl eine Nachfrage vorliegen, als auch ein entsprechendes Angebot. In schrumpfenden Regionen mit Leerstand bei Immobilien ist ein solches Konzept vor allem für den Rückbau interessant.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Das Konzept ist auf urbane und suburbane Räume übertragbar, also auf solche Räume, in denen auch Abbau und Neubau zu erwarten ist. Vor allem sollten die Regionen daher stabil oder wachsend sein. Natürlich kann das Konzept funktionieren, wenn in unmittelbarer Nähe von schrumpfenden Regionen sich solche mit Wachstum befinden.

**Problembewältigungspotenzial**

Der Stoffstrom gehört zu den Mengenmäßig größten in Deutschland, weshalb hier ein großes Potenzial vorliegt.

**Innovationskraft**

Der Einsatz von RC-Beton ist in der Bauwirtschaft in Deutschland nicht etabliert. Die kommunale Ressourcenstrategie ist in diesem Umfang und konsequenten Umsetzung daher sehr innovativ.

**Infrastruktureller Kontext**

Der infrastrukturelle Kontext ist ein zentraler, ferner hier der Einsatz des RC-Betons zentral koordiniert wird über die Stadt Zürich (Hochbauamt).

**Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz**

Für die Bürger haben diese Managementansätze keine negativen Auswirkungen. Die Qualität der Gebäude unterscheidet sich nicht von herkömmlichen und somit ist kein Konfliktpotenzial zu erwarten.

**Ökonomische Tragfähigkeit**

In der Regel ist der Einsatz von RC-Beton kostengünstig, da keine Primärrohstoffe gekauft werden müssen und Energie eingespart wird. Zu beachten ist, dass die Entfernungen zu z. B. Brechwerk, Kiesgrube ein ökonomischer Faktor sind.

122 In der Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin-Mitte“ wurden Ergebnisse angegeben, nachdem die Herstellung von RC-GK deutlich weniger Energie (ca. 35%) benötigt als die Herstellung von Kies. Siehe: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfall/rc-beton/download/dokumentation_einsatz_rc_beton_berlin_hul.pdf (31.08.2016)

**Link/Kontakt**

Amt für Hochbauten,
Annick Lalive d'Epinay, Leiterin Fachstelle Nachhaltiges Bauen
fon 044 412 44 41

**Quellen**

https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/nachhaltiges_bauen/lsp4_tf3.html (13.04.2016).

http://www.energie-ressourcen.ch/Downloads/Ressourcenstrategie_Stadt_Zuerich.pdf (13.04.2016).

http://www.muellundabfall.de/ce/ressourcenstrategie-bauwerk-stadt-zuerich/detail.html (13.04.2016).

### 2.4.4 Maximalrecycling 90 in Baden-Württemberg

Mit dem Projekt Maximalrecycling 90 werden die Teilsysteme Straßenbau (Verkehr) und Energie adressiert. Das Maximalrecycling sieht eine Recyclingquote des alten Fahrbahnbelags von bis zu 90 Prozent vor. Seit 2011 erprobt die Baden-Württembergische Straßenbauverwaltung verschiedene Sonderbauweisen für einzelne Landesstraßen. Bekannt sind dabei die L 181, Ortsumgehung Tannheim, die im März 2013 fertig gestellt wurde sowie die L 1221 zwischen Steinenkirch und Böhmenkirch, die im Mai 2011 einen neuen Fahrbahnbelag bekam. 2014 startete eine zweite Phase des Projektes, sodass nun bei der Hälfte aller Erhaltungsmaßnahmen an Landesstraßen das Prinzip des Maximalrecyclings getestet werden soll.

#### a. Beschreibung Maximalrecycling 90

**Adressierte Probleme und Herausforderung**

Vor dem Hintergrund des politischen Ziels, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren und durch die Priorisierung der Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur vor dem Neubau, erprobt die Baden-Württembergische Landesregierung Techniken zur möglichst ressourcenschonenden Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur.

**Technischer Ansatz**

Die Recyclingquote für alte Fahrbahnbeläge soll mit diesem Verfahren auf bis zu 90 Prozent verbessert werden. Für Bundesstraßenmaßnahmen wurden einzelne Pilotstrecken beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung für 2014 beantragt. Unterdessen wurden in Baden-Württemberg bislang 4 Maßnahmen durchgeführt, bei denen der Recyclinganteil 90 % betrug. In 20 weiteren Fällen lagen die Werte bei 50 % bzw. 75 %.

Beim Maximalrecycling 90 wird das Asphaltgranulat, welches aus dem alten Fahrbahnbelag gewonnen wird, an der Asphaltmischanlage über eine Paralleltrommel zugegeben. Dabei wird ebenso ein Additiv hinzugefügt. Dieses Additiv, hier Storbit Plus, ein Öl-Wachs-Gemisch, hat die Aufgabe, das im Asphaltgranulat vorhandene Bindemittel zu verjüngen und somit einer Versprödung und Rissebildung über die Standzeit hinweg entgegenzuwirken. Die Additivzugabe liegt in der Regel zwischen 0,4 und 0,8 M.-%. Auf diesem Wege ist ein höherer Verwertungsanteil an Recyclingmaterials möglich.

**Ziel (Anreizmechanismen/Motiv)**

Ziel ist es durch den Einsatz von Recyclingmaterial Straßen kostengünstiger, ressourcenschonend und umweltgerechter zu erhalten.

**Investitionskosten/Finanzierung/Betriebskosten**

-

**Räumlicher und demografischer Kontext (urban/suburban/ländlich/ schrumpfend/wachsend)**

nicht zuzuordnen

**Innovationsgehalt/-kern**

Mittels Additivzugabe kann der Recyclinganteil gegenüber der Regelbauweise wesentlich erhöht werden.

**Governance/Steuerungsebene und Akteure**

Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg

- Initiator: Land Baden-Württemberg
- Zielgruppen/Adressat: Nutzer der Landesstraßen (nicht schienengebundener Verkehr)

**Erzielte Ergebnisse, Erfolge**

Die bisherigen Erfahrungen mit den drei Pilotstrecken zeigen, dass die Additivzugabe ein geeignetes Mittel darstellt, den Recyclinganteil gegenüber der Regelbauweise wesentlich zu erhöhen. Baden-Württemberg beabsichtigt das Maximalrecycling zur Regelbauweise im Hauptangebot zu machen.

An den erneuerten Strecken gab es nach ersten Prüfungen mehrere Beanstandungen an der Deckschicht, aufgrund von Abweichungen der Prüfwerte von den Normen. Im Juni 2014 zeigten sich zudem erste Risse in der Fahrbahn der L 1221 außerhalb von Steinenkirch; rund drei Jahre nach der Neuasphaltierung.

Der überwiegende Teil der Maßnahmen erweist sich bislang jedoch als zuverlässig.

**b. Bewertung Maximalrecycling 90**

**Ressourcenleichtigkeit**

Das Projekt Maximalrecycling 90 spart einen großen Anteil an Primärmaterialien im Straßenbau ein. Da die Verkehrsinfrastrukturinstandhaltung und -bau sehr ressourcenintensiv ist, sind hier hohe Einsparpotenziale vorhanden. Ferner wird Energie eingespart sowohl bei der Aufbereitung im Vergleich zur Herstellung von Gesteinskörnung aus Kies als auch durch die geringeren Transportentfernungen. Das Verfahren ist ressourcenleicht durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen Primärrohstoffe ersetzt werden und durch den geringeren Energieverbrauch.

**Demografiefestigkeit**

Bewertungskriterium nicht sinnvoll anwendbar, da BPB kontextunabhängig zum Einsatz kommen kann.

**Räumliche Übertragbarkeit**

Das Maximalrecycling ist unabhängig von räumlichen Kontexten anwendbar. Eingeschränkt werden die Anwendungsräume durch den aufgezeigten Zusammenhang von Ausbau- bzw. Instandhaltungsbedarf und Verfügbarkeit von geeigneten Sekundärrohstoffen.

**Problembewältigungspotenzial**

Das Projekt weist langfristig ein hohes Problembewältigungspotenzial auf. Ein Vorrang der Instandhaltung der Verkehrsinfrastrukturen gegenüber dem Neubau deutet sich an (siehe u.a. Bundesverkehrswegeplanung), sodass sich hier Verwertungspotenziale aufzeigen. In diesem Fall ist das Recycling eine Lösung mit großem Effekt.

### Innovationskraft

Der Ansatz des Recyclings des Altbelags ist nicht neu. Jedoch konnte der Anteil des Recyclingmaterials durch technische Neuerungen im Verfahren erhöht werden. Der erstrebte Anteil von 95 % in Deckschichten ist hier die vorläufige Spitze dieser Entwicklung. Insbesondere ist hier jedoch die institutionelle Innovationskraft des Projektes herauszustellen. Da die Baden-Württembergische Landesregierung die Festlegung des Maximalrecyclings auch juristisch vorantreibt.[123] Auch müssen die Materialien und Verfahren entsprechende Zulassungen erhalten. Außerdem ist hervorzuheben, dass die Verwendung von Recyclingbeton in Deutschland auch im Hochbau thematisiert wird. Erste Pilotprojekte laufen ebenso in Baden-Württemberg und Berlin.[124]

### Infrastruktureller Kontext

Das Projekt bewegt sich zwischen zentralen und dezentralen infrastrukturellen Kontexten. Die Straßeninfrastruktur ist ein zentrales System. Die Aufbereitung des Recyclingmaterials und die Organisation seiner Verwertung sind dezentral. Der Anfall des Recyclingmaterials ist dezentral und wird in lokalen Kreisläufen verarbeitet.

### Übertragbarkeit hinsichtlich der sozialen Akzeptanz

Die Maßnahmen haben für die Bürger keine negativen Auswirkungen, weshalb keine Konfliktpotenziale abzusehen sind.

### Ökonomische Tragfähigkeit

Für die Einschätzung der ökonomischen Tragfähigkeit sind verschiedene Aspekte, die eine ökonomische Rolle spielen, abzuwägen: Preis der Aufbereitung und der Primärrohstoffe, Entfernungen (z. B. Brechwerk, Kiesgrube), Technik, Maschinenauslastung, etc. Kosten für Sekundärmaterial können günstiger sein. Jedoch fallen mitunter Mehrkosten für Prüfzwecke von Recyclingmaterial an, da diese derzeit noch nicht standardisiert sind. Insgesamt ist bei passenden Voraussetzungen eine ökonomische Tragfähigkeit vorhanden. Dies bestätigen die Pilotprojekte, die insbesondere im Raum Stuttgart und Ludwigshafen durchgeführt wurden.

### Link/Kontakt

Ministerium für Verkehr und Infrastruktur
Hauptstätter Straße 67, 70178 Stuttgart
fon 0711/231-4
e-mail poststelle@mvi.bwl.de

### Quellen

http://baunetzwerk.biz/ausbauasphalt-optimal-verwerten/150/4264/83806/ (14.04.2016).

http://www.storz-tuttlingen.com/aktuelles-presse/aktuelle-themen/maximalrecycling-90/ (14.04.2016).

https://www.ise.kit.edu/rd_download/SBT/Maximalrecycling_bei_Asphaltschichten_in_Baden_Wuerttemberg.pdf (14.04.2016).

https://www.google.de/search?q=maximalrecycling+90+baden&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ei=IXNAVs7rCsS7sQG1nYuQCQ (14.04.2016).

http://gsv-verkehrundumwelt.de/index.php?id=90 (14.04.2016).

123 Mit einem Erlass im April 2015 hat das Ministerium für Verkehr und Infrastruktur das Maximalrecycling bei Erhaltungsmaßnahmen von Landesstraßen zur Regelbauweise erklärt.

124 http://www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html (zuletzt abgerufen am 17.06.2016).

# Teil E: Empfehlungen

In den folgenden Handlungsempfehlungen kondensieren und verdichten sich die Analysen und Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte des Forschungsvorhabens RELIS.

In Teil B dieses Berichts wurden die Stärken und Schwächen der wesentlichen Infrastrukturbereiche in Deutschland betrachtet und im Weiteren zu erwartende Entwicklungen wichtiger Treiber des Infrastrukturbedarfs dargestellt und in einem Referenzszenario (vgl. Teil C)verdichtet. Für die Infrastruktursysteme ergeben sich daraus spezifische Chancen und Risiken, die zusammen mit den Stärken und Schwächen bereits erste Hinweise auf strategisch relevante Handlungsfelder lieferten.

Die dadurch mögliche Schwerpunktsetzung war eine wichtige Grundlage für die Definition von Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen (vgl. Teil C). Diese stellen infrastrukturübergreifende Maßnahmenbündel zur Anpassung und Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme dar, die auf der Grundlage der in Wissenschaft und Praxis geführten Diskurse entwickelt wurden. Für die Fallstudien wurden jeweils die Auswirkungen auf die Ressourceninanspruchnahme und weitere Parameter entlang der Zieldimensionen des Vorhabens abgeleitet. Durch den Vergleich von Fallstudien ressourcenleichter Infrastrukturen mit einem Referenzszenario mittels einer orientierenden Stoffstromanalyse und ergänzender qualitativer Untersuchungen war eine erste Einschätzung dahingehend möglich, welche Maßnahmenbündel in den Fallstudien in besonderer Weise einen Beitrag zur Ressourcenleichtigkeit leisten können und dabei möglichst auch umweltschonend, robust und demografiefest sind.

Vor dem Hintergrund der in Teil D dieses Berichts vorgestellten Best-Practice-Beispiele (BPB) wurden weitere Anregungen für mögliche Handlungsempfehlungen abgeleitet, die sowohl konkrete Umsetzungsschritte als auch politische Rahmenbedingungen adressieren. So werden die Ergebnisse und Ableitungen aus den Analysen der Szenarien anhand der Best-Practice-Beispiele weiter untermauert.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Analyseschritte geben Hinweise auf wichtige Handlungsfelder, in denen geeignete Maßnahmen und adäquate Instrumente im Hinblick auf die zukunftsfähige und ressourcenleichte Gestaltung von technischen Infrastrukturen zu finden sind. Im Folgenden werden darauf aufbauend Handlungsempfehlungen formuliert, die einerseits mögliche technische Veränderungen der Infrastruktursysteme thematisieren, andererseits aber auch die institutionellen, rechtlichen, organisatorischen und finanziellen Rahmenbedingungen betreffen.

Die Anpassung, Weiterentwicklung und Umgestaltung der Infrastruktursysteme bedarf aufgrund ihrer Komplexität der Mitwirkung und Kooperation verschiedener Akteure. Trotzdem richten sich die Handlungsempfehlungen z. T. an spezifische Zielgruppen, um so insbesondere diejenigen Akteure anzusprechen, die einzelne Veränderungsprozesse zur ressourcenleichten Gestaltung des Infrastrukturen anstoßen und vorantreiben können. Die ausgewählten Zielgruppen orientieren sich dabei an den heutigen Zuständigkeiten für einzelne Teilaspekte der Bereitstellung von Infrastruktursystemen.

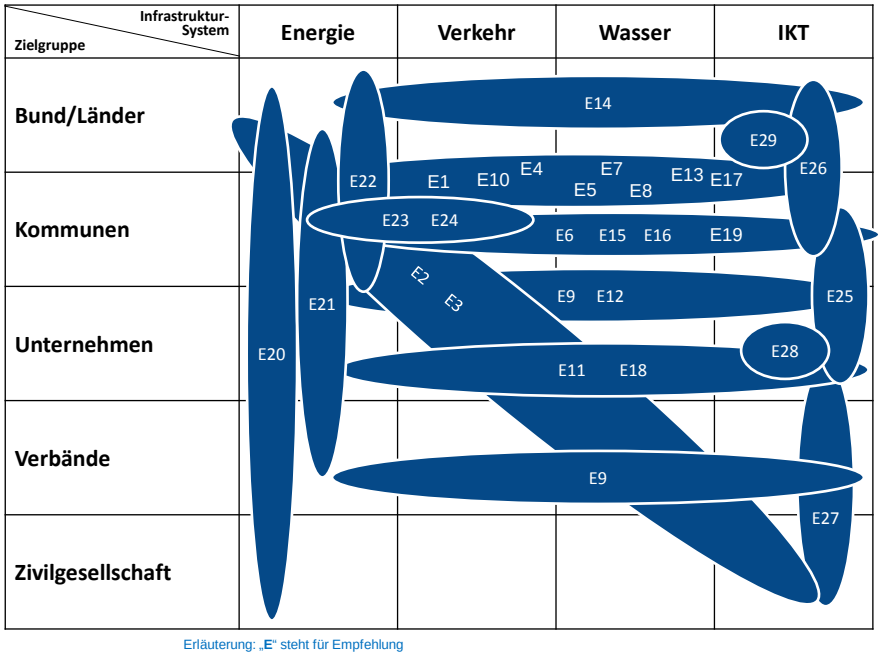
## 1 Empfehlungen im Überblick

Mit dem Ziel, die Handlungsempfehlungen aus RELIS heraus in die (politische) Kommunikation einzuspeisen, wurden die einzelnen empfohlenen Maßnahmen in insgesamt zehn „**zentralen Handlungsfeldern**“ zusammengefasst. Dabei betreffen die Handlungsfelder und sehr häufig auch die einzelnen Empfehlungen mehrere der betrachteten Infrastruktursysteme. Darin zeigt sich der systemische Ansatz, der die Analyse als grundsätzliche Prämisse geprägt hat. Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass isolierte Einzelmaßnahmen für sich genommen kaum zu beurteilen sind, sondern stets der Gesamtkontext aus einer strategischen Perspektive berücksichtigt werden muss.

Selbst die vorgenommene Systematisierung der Empfehlungen (vgl. Abbildung 123) gibt die tatsächlich vorhandenen Zusammenhänge nur eingeschränkt wieder. Die meisten Handlungsempfehlungen

können im Grundsatz auf alle Infrastruktursysteme bezogen werden. Unterschiede gibt es dann in der Ausgestaltung und Operationalisierung in konkreten Instrumenten und Maßnahmen. Außerdem sind in der Regel mehrere Akteure angesprochen, wobei sich die unterschiedlichen Verantwortungsebenen und Beteiligungsarten nicht mehr ohne weiteres darstellen lassen.

Abbildung 123: Empfehlungen im Überblick




Quelle: Difu/Öko-Institut.

Erkennbar wird allerdings, dass sich die ersten Handlungsempfehlungen in besonderer Weise auf alle Infrastruktursysteme beziehen und in vielen Fällen auf ein abgestimmtes und kooperatives Vorgehen der staatlichen und kommunalen Akteure abzielen. Mit aufsteigender Reihenfolge werden die Empfehlungen konkreter und auf einzelne Aufgabenbereiche oder Akteursgruppen zugespitzt. Es gilt allerdings auch bei diesen Empfehlungen, dass einzelne Akteure nur wenig bewirken können. Es kommt also immer darauf an, möglichst breite Unterstützung und Mitwirkung über alle betroffenen Ebenen hinweg zu erreichen.

Im Folgenden werden die identifizierten zehn zentralen Handlungsfelder differenziert dargestellt. Ausgehend von den Ergebnissen der einzelnen Analyseschritte werden einzelne Handlungsempfehlungen mit Argumenten und Erläuterungen gestützt und mit Empfehlungen für praktische Maßnahmen und Instrumente unterfüttert. Diese könnten weiter vertieft und für die einzelnen Infrastruktursysteme mit ihren jeweiligen hochgradig ausdifferenzierten institutionellen Arrangements (man denke nur an die komplexe Governance und Regelstruktur im Energiesektor) weiter konkretisiert werden. Diese sicherlich „lohnende" Aufgabe würde den Rahmen dieses Vorhabens jedoch sprengen.

# 2 Handlungsempfehlungen im Detail

Die strukturierende Ebene der Handlungsfelder lässt erkennen, dass zwischen einzelnen Empfehlungen (E) Zusammenhänge bestehen. Den Einstieg bilden Handlungsfelder, die einen übergeordneten Charakter haben und dabei wesentliche Voraussetzungen für die Umsetzung weiterer Empfehlungen betreffen. In der aufsteigenden Reihenfolge werden die Handlungsfelder dann zunehmend konkreter.

## 2.1 Handlungsfeld: Bewusstsein schaffen, Ziele festlegen

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Im Vorhaben RELIS geht es bei der Suche nach ressourcenleichten Gestaltungen von technischen Infrastruktursystemen auch darum, zur Erfüllung bestimmter politischer Vorgaben und Ziele der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie beizutragen (z. B. Rohstoffproduktivität, Primärenergieverbrauch, THG-Emission, Anteil an erneuerbaren Energien, Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme, Reduktion der Schadstoffbelastung der Luft, Mobilitätsziele usw.), wobei Ressourcenleichtigkeit im Fokus steht. Mit „ressourcenleicht“ im Sinne dieses Forschungsvorhabens ist die Minimierung von Ressourceninanspruchnahme während des ganzen Lebenszyklus von Infrastrukturen, d. h. Errichtung, Betrieb, Instandhaltung, Rückbau und Entsorgung, gemeint. Als Parameter für die Ressourceninanspruchnahme werden Materialien, Energie und Fläche betrachtet.

Infrastrukturen sind sozio-technische Systeme und können als solche nicht nur auf ihre technischen Funktionen reduziert werden. Die Auswertung der Infrastrukturdiskurse in Wissenschaft und Praxis machte den engen Zusammenhang zwischen der Entwicklung der (öffentlichen) Infrastruktur und politischen Vorgaben und Zielen/Entwicklungsvorstellungen erkennbar. Allerdings stehen die Ziele der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie nicht allein im Fokus, sondern etablierte Prinzipien (wie Daseinsvorsorge) und Gestaltungsmerkmale (z. B. bewährte Konstruktionen) spielen ebenfalls eine tragende Rolle.

Als wichtiger Zukunftstrend wurden sich verändernde Anforderungen und Prinzipien der Gestaltung von Infrastruktursystemen identifiziert (vgl. Teil B), z. B. wegen Veränderung der Nachfrage infolge des demografischen Wandels. Zwischen den etablierten Prinzipien (z. B. in Verbindung mit Daseinsvorsorge) und Gestaltungsmerkmalen ist „Ressourcenleichtigkeit“ als Begriff infrastrukturpolitischen Entscheidern in dieser Form noch nicht bekannt. Gedankliche Anknüpfungspunkte bietet der „sparsame Umgang mit Ressourcen“ oder auch die Ressourceneffizienz. Für eine weitergehende Verbreitung des Begriffs der Ressourcenleichtigkeit bedarf es entsprechender Impulse.

Darüber hinaus wurde erkennbar, dass neben der Ressourcenleichtigkeit auch die weiteren Ziele und Merkmale (demografiefest, robust, umweltschonend) der Infrastrukturgestaltung/-entwicklung nicht widerspruchsfrei sind. Die jeweilige Problemlösung hängt dabei beispielsweise von spezifischen Raum- und Siedlungsstrukturen, der regionalen demografischen Entwicklung und regionalen Wirtschaftsstrukturen (räumlicher Kontext) ab. Auch werden in den einzelnen Infrastruktursektoren z. T. sehr unterschiedliche Zielvorstellungen ihrer künftigen Weiterentwicklung sichtbar (vgl. Diskurs zu Neuartigen Sanitärsystemen – NASS in der Siedlungswasserwirtschaft oder unterschiedliche Positionen in den Diskursen der Energiewende). Es sind in der Praxis demnach sehr unterschiedliche Bewertungen und Priorisierungen der verschiedenen Zielsysteme zu beobachten.

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse zeigen, dass sich die einzelnen betrachteten Parameter (KRA, KEA, THG, Fläche) zur Bestimmung von „Ressourcenleichtigkeit“ in unterschiedliche Richtungen entwickeln können. So erfordern beispielsweise die möglichen Reduktionen von THG-Emissionen ($CO_2$-Äquivalente) durch die Elektromobilität in der Fallstudie „Kopplung Verkehr – Energie“ einen sehr viel höheren Materialeinsatz (KRA) zur Errichtung der Energieerzeugungs-, Lade- und Netzinfrastruktur. Eine wichtige Rolle spielt dabei auch der erforderliche zusätzliche Einsatz seltener oder kritischer Rohstoffe wie Lithium und Neodym, deren Verfügbarkeit eingeschränkt ist bzw. deren

(aktuelle) Förderung mit erheblichen Folgen z. B. durch radioaktiven Abraum verbunden ist. Auch der in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ betrachtete Ausbau der Informations- und Kommunikationstechnik als Voraussetzung für die Sektorkopplung und für Einsparungen im Verkehrsbereich führt zuerst einmal zu mehr Ressourceneinsatz. Dem gegenüber stehen in den genannten Fallstudien positive Effekte durch die Reduktion des Energieverbrauchs im Fahrzeugbetrieb, von Luftschadstoffemissionen und Lärm durch die Elektrifizierung bzw. Verkehrsvermeidung. Diese in Bezug auf die Zieldimensionen zum Teil gegenläufigen Effekte erschweren eine eindeutige Bewertung der Fallstudien – und damit letztlich auch die Bewertung anderer Maßnahmenbündel.

Aus diesen Ergebnissen und Reflektionen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

**Empfehlungen**

**E1**: Das Thema „Ressourcenleichte Infrastrukturen“ muss den Entscheidungsträgern in Bund/Ländern und insbesondere Kommunen sowie darüber hinaus auch anderen relevanten Stakeholdern stärker bewusst gemacht werden.

**E2**: Die Ziele und Merkmale (ressourcenleicht, demografiefest, robust, umweltschonend) der Infrastrukturgestaltung/-entwicklung müssen in ihren jeweiligen räumlichen und institutionellen Kontexten politisch verhandelt und demokratisch legitimiert werden.

**E3**: Die Auseinandersetzung mit Fragen der zukünftigen Gestaltung der Infrastrukturen sollte sektorenübergreifend und zugleich kontextspezifisch erfolgen.

**E4**: Die ressourcenleichte Gestaltung/Umgestaltung von Infrastrukturen sollte stets im Zusammenhang mit anderen umweltbezogenen Zielen begriffen werden. Unter Umständen muss eine vorübergehend erhöhte Ressourceninanspruchnahme für eine langfristig robuste und umweltschonende Infrastruktur in Kauf genommen werden.

**Adressaten der Empfehlungen**

Die genannten Empfehlungen (E1, E2, E3, E4) betreffen alle betrachteten Infrastruktursysteme und richten sich in erster Linie an den Bund (hier insbesondere das Bundesumweltministerium und das Umweltbundesamt). Empfohlen wird, den Ansatz der Ressourcenleichtigkeit zu einem konsistenten Konzept weiterzuentwickeln und so die Umsetzung voranzutreiben. Darüber hinaus sind Länder und Kommunen adressiert. Die Berücksichtigung der demokratischen Legitimierung (E2) bei gleichzeitiger sektorenübergreifender Perspektive (E3) ist neben den hier primär angesprochenen staatlichen Akteuren darüber hinaus auch für weitere Akteure von Bedeutung. Insbesondere Unternehmen als Infrastrukturbetreiber und Anbieter von infrastrukturbezogenen Dienstleistungen sind mit ihrer Fachkenntnis gefragt, sich in die Debatten einzubringen (vgl. dazu auch Teil E Kapitel 3).

**Maßnahmen und Instrumente**

- Berücksichtigung der Ressourcenleichtigkeit in fachpolitischen Debatten:
  Die Empfehlungen E2 und E3 lassen sich umsetzen, indem Ressourcenleichtigkeitsziele für Infrastruktursysteme verstärkt in fachpolitische Debatten eingespeist werden. Konkret kann dies bedeuten, dass beispielsweise die Ressourceninanspruchnahme einzelner Ausgestaltungsvarianten in den verschiedenen Szenarien der Netzentwicklungspläne Strom und Gas als Bewertungskriterien etabliert werden. Anknüpfungspunkte bietet auch eine Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess), bei der Aspekte ressourcenleichter Infrastruktursysteme stärker als bisher thematisiert und verankert werden könnten. In die gleiche Richtung würde eine stärkere Positionierung der Ressourcenleichtigkeit als Forschungsthema zielen.
- Ressourcenleichtigkeit als Kriterium bei Planungsprozessen:
  Ressourcenleichtigkeitsaspekte bzw. -ziele sollten generell dort zum Kriterium werden, wo auf

Seiten des Bundes, der Länder und der Kommunen sowie der Infrastrukturbetreiber vorbereitende oder konkrete Infrastrukturplanungen vorgenommen und einer Bewertung unterzogen werden, beispielsweise im Rahmen der Strategischen Umweltprüfung (SUP) und Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Empfehlungen für Ziele und Indikatoren aus umweltpolitischer Sicht sollten ausgesprochen werden.

- Information über Fachveranstaltungen und Best-Practice-Beispiele:
  Information und Aufklärung aller relevanten Stakeholder, beispielsweise im Rahmen von Fachveranstaltungen und durch die hervorgehobene Präsentation von Best-Practice-Beispielen sind wichtige Maßnahmen, um Aspekte einer ressourcenleichten Infrastrukturbereitstellung in übergreifende Diskussionen über gesellschaftliche Visionen und in konkrete politische und administrative Entscheidungen einfließen zu lassen.
- Auseinandersetzung mit dem Begriff „Ressourcenleichtigkeit“:
  Zur Information und Aufklärung ist auch eine weitere Auseinandersetzung mit dem etwas „sperrigen“ Begriff Ressourcenleichtigkeit sinnvoll. Dieser gehört derzeit noch nicht zum etablierten Vokabular thematisch nahestehender Diskurse. Gleichzeitig kann dies aber auch eine Chance sein: Der Begriff wurde vor dem Hintergrund eines systemischen Ansatzes gewählt und kann mit seiner Bedeutung einen breiteren Kontext als beispielsweise Ressourcenschutz ansprechen. Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt sind prädestiniert, diese Auseinandersetzung anzuregen und zu steuern.
- Ressourceninanspruchnahme als Bewertungskriterium bei kommunaler Planung:
  Auch auf kommunaler Ebene kann die Ressourceninanspruchnahme als Bewertungskriterium in Planungs- und Steuerungsinstrumente integriert werden, beispielsweise in Energiekonzepte, Verkehrskonzepte und weitere Konzepte der Fachplanung in den Kommunen und Betrieben. Damit würden Ressourceneffizienzpolitik unterstützt und die Entwicklung kommunaler Ressourcenstrategien gefördert werden. Zu erarbeiten ist in diesem Zusammenhang gleichwohl noch auf methodisch-konzeptioneller Ebene, wie „Ressourcenleichtigkeit“ vor Ort operationalisiert werden kann und welche Daten in den Kommunen für die Bestimmung von Ressourcenleichtigkeit und dem Lebenszyklus von Infrastruktursystemen vorliegen. Hier dürfte Unterstützung für Kommunen von außen angezeigt sein. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch die Auslobung eines Wettbewerbs „Ressourcenleichte Kommune“.

## 2.2 Handlungsfeld: Unterschiedliche räumliche Kontexte beachten

### Ergebnisse der bisherigen Analyse

Die betrachteten Infrastruktursysteme haben sehr unterschiedliche räumliche Skalierungen (international, national, regional, lokal/gesamtstädtisch, teilräumlich), vor allem in Hinblick auf die Technik (insb. Netze), Infrastrukturbetreiber/Unternehmen, Märkte, Planungen und Governance-Strukturen. Bereits im Rahmen der ersten Überlegungen zu Stärken und Schwächen der Infrastrukturteilsysteme in Bezug auf eine ressourcenleichte Gestaltung (SWOT-Analyse) wurden unterschiedliche Potenziale diskutiert (vgl. Teil B Kapitel 3). Lokal begrenzte, weitgehend autonome Netze bzw. Infrastrukturkomponenten wie z. B. Abwasser- oder Wärmenetze bieten andere Ansatzpunkte für eine ressourcenleichte Gestaltung als national ausgelegte, flächendeckende Netze wie z. B. IKT, Stromnetz und Verkehrsinfrastrukturen. Mit einer kleineren räumlichen Skalierung muss zwar nicht zwingend eine geringere Komplexität der Systeme einhergehen, jedoch stellen sich die Akteurskonstellation (Anzahl und Art der Akteure) sowie das institutionelle Arrangement (Regelsysteme) anders dar. Für Infrastrukturen mit kleineren räumlichen Skalierungen können die Steuerung und Entscheidungen zur Gestaltung räumlich begrenzter Infrastruktursysteme vor Ort getroffen und lokal angepasst erfolgen. Und gleichzeitig existieren technische Optionen für Infrastrukturen der Siedlungswasserwirtschaft oder auch der Wärmewende, die eine Umgestaltung und Anpassung im lokalen Rahmen ermöglichen.

Doch selbst lokal begrenzte Infrastruktursysteme (Bsp. Abwasser, Wärme) unterliegen einerseits einem nationalen institutionellen Rahmen und sind andererseits über Sektorkopplungen wie z. B. über IKT, Strom- und Gasnetze an regionale und nationale Infrastrukturen angeschlossen. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen räumlichen und infrastrukturellen Ebenen ist in jedem Fall zu beachten. Dies gilt umso mehr für die Infrastrukturen, die in einem Mehrebenen-System in ihren räumlichen Skalierungen eng verflochten sind, wie dies im IKT-Bereich, dem Verkehrssektor, dem Stromsektor, aber auch der Gasversorgung gegeben ist.

Für eine Umsetzung entsprechender Maßnahmen müssen die vor Ort bereits vorhandene Infrastruktur bzw. deren Zustand, Abschreibungszeiträume etc. reflektiert werden und darüber hinaus weitere Voraussetzungen erfüllt sein, beispielsweise die für einen ökonomischen Betrieb notwendige Mindestsiedlungsdichte im Falle von zentral-lokalen Wärmenetzen.[125] Je nach räumlicher Abgrenzung können entsprechende Parameter für ein Infrastruktursystem sehr homogen sein (enger räumlicher Kontext, z. B. Stadtgebiet) oder sehr differenziert (weiter räumlicher Kontext, z. B. Deutschland insgesamt). Auch dies spricht für die Bedeutung, die der räumliche Kontext für die Gestaltung von Infrastruktursystemen und für die Wahl einer geeigneten Vorgehensweise hat. Gerade in weitreichenden Umgestaltungen zeigt sich, wie sich Kontexte im Laufe der Zeit auch verändern können.

Die Analysen haben auch gezeigt, dass Entwicklungen/Veränderungen von Rahmenbedingungen (Demografie, sozio-ökonomische Aspekte, Raum- und Siedlungsstrukturen, Klima etc.) für Infrastrukturen erst im jeweiligen räumlichen Kontext konkret erkennbar und die Effekte von Maßnahmen und Gestaltungsoptionen bewertbar werden.

Die orientierende Stoffstromanalyse konnte dies aufgrund ihrer methodischen Grenzen nur sehr grob aufgreifen. Die Auseinandersetzung mit den für Deutschland insgesamt entwickelten Szenarien der Infrastrukturgestaltung auf einer hohen Aggregationsebene (Fallstudien), musste die zum Teil sehr unterschiedlichen Entwicklungsverläufe auf der regionalen bzw. lokalen Ebene unberücksichtigt lassen. In der Diskussion mit den Fachexperten aus dem Projektbeirat und dem UBA wurde jedoch noch einmal deutlich herausgearbeitet, dass Maßnahmen für eine ressourcenleichte Umgestaltung von Infrastrukturen nicht nur auf urbane und prosperierende Räume zugeschnitten werden dürfen.

Aus diesen Ergebnissen und Reflektionen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

### Empfehlungen

**E5**: Unterschiedliche räumliche Kontexte spielen schon bei der Diskussion über Zieldefinitionen eine wichtige Rolle und sind auch aus diesem Grund bei der Anpassung, Weiterentwicklung bzw. dem Umbau von Infrastrukturen zu berücksichtigen. In jedem Fall ist das Zusammenspiel der unterschiedlichen (räumlichen und institutionellen) Ebenen zu gewährleisten.

**E6**: Die Bewertung konkreter Gestaltungsoptionen sollte entsprechend dem Subsidiaritätsprinzip auf lokaler bzw. regionaler Ebene erfolgen, weil nur dann regionale Besonderheiten und Rahmenbedingungen berücksichtigt werden können und sich die zu erwartenden Effekte greifbarer kommunizieren lassen. Dies gilt für räumlich begrenzte Infrastrukturen ebenso wie für übergeordnete (nationale) Planungen, die sich gleichwohl in konkreten Räumen niederschlagen.

125 Andere Infrastrukturen wie Strom oder Bundesfernstraßen lassen sich hingegen auch von Kriterien wie „Gleichwertigkeit der Lebensverhältnisse“ bzw. „Distributionsprinzip“ leiten. Hier mag zwar die Versorgungsdichte unter Umständen mit der Zahl der Einwohner abnehmen (etwa Autobahnanschlüsse), es wird aber sichergestellt, dass letztlich jeder mit vertretbarem Aufwand einen Zugang hat.

### Adressaten der Empfehlungen

Die genannten Empfehlungen richten sich unabhängig vom Infrastrukturbereich in erster Linie an Politik und Verwaltung. Die kontextbezogene Zieldiskussion (E5) betrifft dabei alle staatlichen Ebenen, adressiert dabei insbesondere Akteure der räumlichen Planung in Land, Region und Kommune sowie die Infrastrukturplanung (z. B. Bundesnetz-Agentur, Infrastrukturbetreiber der Übertragungs- und Verteilungsnetze etc.). Die Bewertung konkreter Gestaltungsoptionen ist dagegen ein Thema, das in besonderer Weise auf kommunaler Ebene zu verhandeln ist – gerade wenn lokal begrenzte Infrastrukturen geplant werden wie die Wärmeversorgung, Trinkwasser- und Abwassersysteme und deren Kopplungspotenziale.

### Maßnahmen und Instrumente

- Vergleichende Betrachtung von Ausgestaltungsstrukturen:
  Eine vergleichende Betrachtung zentraler, semizentraler und dezentraler Ansätze und die Auseinandersetzung mit verschiedenen räumlichen Skalierungen (Haus – Quartier – Gesamtstadt; Quartier – Stadt – Region), die je nach Sektor und Sektorkopplung (Abwasser – Wärme/Gas, Strom – Mobilität, Strom – Gas – Wärme) sehr unterschiedlich aussehen können, sind wichtige Schritte auf dem Weg zu Maßnahmen, um den raumbezogenen Anforderungen an Infrastruktur gerecht zu werden (vgl. beispielsweise das BPB „Dahler Feld“).
- Besonderer Fokus auf Stadt:
  Die Umsetzung von Optionen einer ressourcenleichten Infrastrukturgestaltung kann durch einen besonderen Fokus auf urbane und suburbane Räume begünstigt werden. Hier sind wichtige Voraussetzungen (z. B. Mindestsiedlungsdichte, finanzstarke Akteure, verfügbares Knowhow) eher gegeben als im ländlichen Raum. Von besonderer Bedeutung sind auch dynamische und wachsende Regionen. Die hier zu erwartende steigende Ressourceninanspruchnahme erhöht einerseits den Handlungsdruck, schafft aber andererseits auch den Raum, um Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz und zur Hebung von Synergieeffekten im Bereich der Infrastruktur (Energie, Abwasser, ÖPNV) zu realisieren. Konkrete Beispiele für entsprechende Maßnahmen finden sich deshalb auch insbesondere in den regionalen Wachstumskernen (vgl. beispielsweise die BPB aus Salzburg, Kopenhagen oder Stockholm).
- Ergänzung der SUP und der UVP:
  Eine weitere konkrete Maßnahme zur Verknüpfung der fachlichen Planung ressourcenleichter Infrastrukturen mit räumlichen Merkmalen und Besonderheiten wäre die Ergänzung der Strategischen Umweltprüfung (SUP) von Regionalplänen um das Kriterium „Ressourceninanspruchnahme der (technischen) Infrastruktursysteme“ (Lebenszyklus-Ansatz).[126] Dies sollte auch auf die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) von konkreten Projekten angelegt werden, die auf Basis von räumlichen Planungen umgesetzt werden.
- Überregionale Planungen als Orientierungsrahmen:
  Zu berücksichtigen ist bei allen Maßnahmen, dass auch bei einer Fokussierung auf regionale und lokale Zusammenhänge der überregionale Kontext nicht verloren gehen sollte. Ansonsten bestünde die Gefahr, dass überregional bedeutsame Maßnahmen vernachlässigt und großräumige Strategien behindert werden könnten. Auch der mögliche Konflikt zwischen einer kleinräumigen Optimierung und den Gesamtsystemerfordernissen z. B. im Stromnetz muss thematisiert werden. Insofern sollten übergeordnete Planungen Orientierungen für lokale Akteure geben und sektorale Planungen mit räumlicher Gesamtplanung abgestimmt werden (Subsidia-

126 Vielleicht wäre es auch eine geeignete Empfehlung an UBA/Politik, dafür entsprechende Instrumente bzw. Tools zur Bewertung zu entwickeln und bereitzustellen oder Standards zu schaffen. Denn die Bewertung kommunaler Gestaltungsoptionen bettet sich in einen nationalen Kontext (z. B. Strom) ein, weshalb eine Einheitlichkeit und damit auch Vergleichbarkeit sinnvoll erscheinen.

rität). Diese Grundsätze sind durch Anpassungsgebot, Gegenstromprinzip etc. in BauGB und ROG verankert, fraglich ist jedoch deren Praxis. Insbesondere das Verhältnis von Raumordnungsplanung zu Fachplanungen (z. B. Netzplan, SUP, UVP) müsste hier in den Blick genommen werden.

## 2.3 Handlungsfeld: Gebauter Infrastrukturbestand – Perspektivwechsel zur Nutzung der bestehenden Infrastrukturen einnehmen

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Ressourcenleichte Infrastruktur wurde im Rahmen der durchgeführten Analyse insbesondere aus der Perspektive der gebauten Infrastruktur betrachtet. Deren Bestand ist in Deutschland enorm. Der heute schon hohe Bestand an technischen Infrastrukturen wird auch langfristig zu einer hohen Ressourceninanspruchnahme führen. Dies wird mit Blick auf die Ergebnisse der Stoffstromanalysen in den relativ kleinen Abweichungen der Fallstudien gegenüber dem Referenzszenario deutlich. Eine heute getroffene Entscheidung über eine Netzerweiterung wird auch zukünftig aufgrund der teilweise hohen Lebensdauern für viele Jahre zu einer weiteren Ressourceninanspruchnahme führen, der „Infrastrukturrucksack“ wird damit vergrößert. Im Infrastrukturbestand ist ein umfangreiches anthropogenes Lager mit einem damit verbundenen großen „Materialien-, Energie- und Flächenrucksack“ angelegt. Als Ausgangspunkt für eine Anpassung/Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme wurden insbesondere die Merkmale dieses Bestandes angesehen. So stellt beispielsweise die lange Nutzungsdauer vieler Infrastrukturkomponenten einerseits eine Stärke dar, weil der hohe Aufwand der Errichtung nur durch eine entsprechend lange Nutzung gerechtfertigt und tragbar erscheint. Andererseits werden die Systeme aufgrund der langen Nutzungszeiträume unflexibel (etwa in Hinblick auf notwendige Anpassung an den Klimawandel oder rückläufige Bevölkerungszahlen). Es entstehen Pfadabhängigkeiten, und insbesondere für eine koordinierte Umgestaltung mehrerer Teilsysteme mit dem Ziel einer stärkeren Kopplung ergeben sich daraus besondere Herausforderungen.

Im Ergebnis der bisherigen Analyse hat sich gezeigt, dass die vorhandene Infrastruktur immer dann ressourcenleichter gestaltet werden kann, wenn einzelne Komponenten am Ende ihrer technischen Nutzungsdauer ersetzt werden müssen oder wenn Infrastrukturbestandteile aufgrund sinkenden Bedarfs nicht mehr benötigt und deshalb zurückgebaut werden.

Der umfassende Rückbau von Infrastruktur ist jedoch eher die Ausnahme. In der Praxis muss in diesem Zusammenhang auch mit Akzeptanzproblemen (vgl. Teil C Kapitel FS 3) gerechnet werden, da in den meisten Fällen auch bei rückläufigem Bedarf eine Restnachfrage bestehen bleibt, die bei einem Rückbau nicht mehr befriedigt werden könnte (z. B. ältere Standards bei den Mobilfunknetzen). In der orientierenden Stoffstromanalyse wurden deshalb auch nur in geringem Umfang Annahmen zum Rückbau von Infrastrukturen getroffen. Entsprechend sind die darauf basierenden Effekte sehr gering.

Größere Auswirkungen hat der ressourcenleichte Ersatz von Infrastruktur, beispielsweise wenn bei der Erneuerung von Straßenbelägen verstärkt mit Recycling-Asphalt gearbeitet wird (vgl. Teil C Kapitel FS 4). Aufgrund der langen Nutzungszeiträume sind der Umgestaltung der Infrastruktursysteme hier jedoch in vielen Bereichen Grenzen gesetzt. Ein Ersatz erfolgt in der Praxis nur selten vor Ablauf des vorgesehenen Nutzungszeitraums. Darüber hinaus können durch heute durchgeführte Maßnahmen neue Pfadabhängigkeiten und zukünftige Ressourceninanspruchnahmen induziert werden.

Weitgehend ausgeblendet bleibt bei den bisherigen Betrachtungen, welche Auswirkungen eine Umgestaltung von Infrastrukturen auf deren **Nutzung** und den damit verbundenen Ressourceneinsatz hat. In der Analyse wurden solche Effekte exemplarisch für die Kopplung von Verkehr und Energie analysiert, die positive Effekte mit Blick auf Ressourcenleichtigkeit (Energieverbrauch) insbesondere in der Nutzung der Straßenverkehrsinfrastruktur bzw. dem Fahrbetrieb mit Elektro-Fahrzeugen erzielt. Im

Ergebnis wurde das besondere Potenzial erkennbar, dass sich hinsichtlich der Einsparung von Ressourcen aus der Nutzung der (umgestalteten) Infrastruktur ergeben kann.

Aus diesen Ergebnissen und Reflektionen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

### Empfehlungen

**E7**: Bei der Prüfung der Umsetzung neuer Infrastrukturprojekte muss die zukünftig induzierte Ressourceninanspruchnahme im gesamten Lebenszyklus (also etwa für Betrieb, Instandhaltung und auch Ersatzneubauten) bei der Bewertung von alternativen Realisierungsoptionen mit berücksichtigt werden.

**E8**: Eine ressourcenleichte Infrastrukturgestaltung darf nicht auf die gebaute Infrastruktur beschränkt bleiben, sondern muss auch die (ggf. veränderte) Nutzung als Betrachtungsperspektive einbeziehen.

### Adressaten der Empfehlungen

Die genannten Empfehlungen (E7, E8) richten sich in erster Linie an Politik und Verwaltung aller staatlichen Ebenen. Daneben sind auch Unternehmen (Infrastrukturbetreiber und spezialisierte Planungsbüros) an diesem Punkt adressiert. Dabei sind alle Infrastruktursektoren angesprochen.

### Maßnahmen und Instrumente

- Berücksichtigung zukünftig induzierter Ressourceninanspruchnahmen durch Lebenszyklusansatz:
  Die Ressourcenleichtigkeit beinhaltet den Lebenszyklusansatz und ermöglicht damit die Berücksichtigung zukünftig induzierter Ressourceninanspruchnahmen schon frühzeitig im Planungsprozess von Infrastrukturmaßnahmen. Kern dieses Ansatzes ist die ganzheitliche Betrachtung einer Anlage oder Einrichtung in den Phasen Planung, Bau, Finanzierung, Betrieb/Nutzung sowie Verwertung/Rückbau. Bei Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen gehört der Lebenszyklusansatz in Bezug auf die zu erwartenden finanziellen Auswirkungen bereits zum etablierten Instrumentarium. Eine Übertragung des Ansatzes auf die im Zusammenhang mit Ressourcenleichtigkeit relevanten Parameter könnte auf diesen Erfahrungen aufbauen (z. B. der Bau von Güterverkehrszentren, die dann durch die Nutzung zu einer Entlastung bei KEA und THG führen können). Entsprechend sollten Entscheidungen über Infrastrukturmaßnahmen die Nutzungspotenziale und mögliche Nutzungsänderungen in den Blick nehmen und sie auch hinsichtlich ihrer Nutzungsflexibilität bewerten. Dazu gehört eine integrierte Bewertung von Alternativen zur Zielerreichung.
- Besonderer Blick auf Ressourcenverbrauch der Nutzung:
  Nicht nur die Errichtung, Instandhaltung, Entsorgung der Infrastruktur erfordert den Einsatz von Ressourcen, sondern auch ihre Nutzung. Erst durch eine systemische Betrachtung unter Berücksichtigung der bei den Nutzenden entstehenden Ressourcenverbräuche ist eine Bewertung von Maßnahmen zur Umgestaltung von Infrastruktur in Bezug auf ihren Beitrag zur Ressourcenleichtigkeit möglich. Ein Beispiel hierfür ist der Ausbau von IKT-Infrastruktur, der eine Voraussetzung für Sektorkopplung und Maßnahmen in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ und „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ ist.
- Berücksichtigung Verhalten der Nutzenden:
  Durch den empfohlenen Perspektivwechsel wird es auch möglich, anders über die Zusammenhänge zwischen Infrastrukturgestaltung und dem dadurch beeinflussten Verhalten der Nutzenden nachzudenken. Dadurch kann auch das Risiko reduziert werden, dass eine ressourcenleicht verschlankte Infrastruktur u.U. Maßnahmen zur Kompensation erforderlich macht, z. B.

um ihre erhöhte Anfälligkeit auszugleichen, und damit wieder neue Ressourceninanspruchnahmen verursacht.

## 2.4 Handlungsfeld: Ressourcenleichtes Verhalten durch Infrastrukturen ermöglichen

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Wie insbesondere die Fallstudien „Innovationen im Verkehrsbereich“ und „Kopplung Verkehr – Energie“ sowie die Verknüpfung dieser beiden Fallstudien in Szenarette 2 zeigen, dienen Infrastrukturen als ermöglichende Grundlage für den ressourcenleichten Betrieb. Auch wenn durch neue Komponenten (z. B. Oberleitungsinfrastruktur) oder Netzausbau (z. B. IKT-Infrastruktur) die Ressourceninanspruchnahme steigt, kann dies eine weitaus stärkere Minderung bei ihrer Nutzung ermöglichen. Eine stärkere Berücksichtigung der Nutzungsperspektive von Infrastrukturen kann nicht nur dazu beitragen, Ressourcenverbräuche umfassend abzubilden. Sie kann auch Hinweise darauf liefern, wie durch die Gestaltung von Infrastrukturen ein ressourcenleichtes Verhalten erst ermöglicht wird. So bietet beispielsweise das Infrastrukturteilsystem Abwasserentsorgung eine Reihe von technischen Optionen, die eine ressourcenleichtere Ausgestaltung ermöglichen könnten. Dieser Aspekt wurde im Rahmen der SWOT-Analyse als Stärke eingeordnet. Allerdings erfordern die denkbaren Systemanpassungen häufig mehr oder weniger starke Veränderungen beim Nutzerverhalten. Das kann die Akzeptanz von Strategien und Maßnahmen beeinträchtigen. Lassen sich die Nutzenden jedoch auf diese Veränderungen ein, können sie durch ihr verändertes Verhalten nicht nur eine ressourcenleichte Infrastruktur nutzen, sondern auch selbst zur Reduzierung der Ressourceninanspruchnahme beitragen.

Auch in anderen Infrastrukturteilsystemen lassen sich technische Optionen einer ressourcenleichten Infrastrukturgestaltung finden, die ein entsprechend sparsames Verhalten bei den Nutzenden unterstützen – aber eben auch verändertes Handeln erfordern (vgl. das BPB „Mobilcard Krenglbach“ inkl. eCarsharing oder die „Intermodalitätskarte“ in Stuttgart). Voraussetzung für die Akzeptanz und Übernahme ressourcenleichter Verhaltensweisen ist unabhängig vom Infrastruktursystem das Vorhandensein eines zusätzlichen positiven Effekts für die Nutzenden. Dieser positive Effekt kann dadurch entstehen, dass ein bereits vorhandenes Bedürfnis nach einer umweltschonenden Lebensweise befriedigt werden kann. Ein Zusatznutzen kann auch durch Anerkennung und positive Rückmeldungen aus dem eigenen sozialen Umfeld entstehen, wenn dort ein entsprechender Lebensstil angestrebt wird. Ganz klar messbar wird ein positiver Effekt, wenn die Nutzenden nicht nur weniger natürliche Ressourcen in Anspruch nehmen, sondern dabei auch im ökonomischen Sinne sparen können.

Wenn es nicht gelingt, mit einer ressourcenleichten Ausgestaltung von Infrastrukturen und deren Nutzungsprinzipien einen ausreichend großen zusätzlichen positiven Effekt für die Nutzenden zu generieren, ist es auch denkbar, das individuelle Kosten-Nutzen-Verhältnis etablierter, aber ressourcenintensiver Angebote durch negative Anreize zu senken. Die anhaltende Diskussion in Wissenschaft und Praxis über Instrumente wie City-Maut oder Parkraumbewirtschaftung zeigt jedoch, dass der Einsatz negativer Anreize ebenfalls zu Akzeptanzproblemen führen kann. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Alternativen zum ressourcenineffizienten motorisierten Individualverkehr zu stärken und deren barrierefreie Nutzung attraktiv zu gestalten. Mit individuellem Marketing für ÖPNV-Nutzung oder fahrscheinlose Nutzung wurden gute Erfahrungen für die Erreichung von Veränderungen im Mobilitätsverhalten weg von der Pkw-Nutzung gemacht.

Andererseits können mit Maßnahmen unerwünschte Nebenwirkungen einhergehen, wenn z. B. mit einer schlechteren Erreichbarkeit von Stadt(teil)zentren für Auto-Nutzende (z. B. aufgrund von City-Maut oder Einfahrbegrenzungen) ein Attraktivitätsverlust dieser Zentren nicht ausgeschlossen werden kann. Die damit verbundenen sozio-ökonomischen Nachteile können den Vorteil einer ressourcenleichten Infrastrukturgestaltung übersteigen.

Die Auseinandersetzung mit einigen denkbaren technischen Möglichkeiten zur ressourcenleichten Umgestaltung von Infrastrukturen zeigt, dass es dabei vielfältige Möglichkeiten zur Einführung neuer Geschäftsmodelle und Produkte gibt, die ressourcenleichtes Verhalten fördern können. Von besonderer Bedeutung ist dabei die IKT-Infrastruktur, wobei auch hier der Rebound mit kalkuliert werden sollte. Beispielsweise kann autonomes Fahren in Verbindung mit Sharing-Angeboten in Richtung eines Verzichts auf einen eigenen Pkw wirken. Andererseits kann die Fahrzeit beispielsweise zum Schlafen, Arbeiten oder Frühstücken genutzt werden, wodurch die Bereitschaft, z. B. längere Pendelwege in Kauf zu nehmen, eine Folge sein kann. Außerdem können zusätzliche motorisierte individuelle Fahrten von Personen, die selbst kein Kraftfahrzeug führen dürfen oder können, als Folge eintreten. Die dadurch resultierende zusätzliche Verkehrsleistung würde der Intention der ressourcenleichten Umgestaltung des Verkehrs entgegenwirken.

Die Ergebnisse der orientierenden Stoffstromanalyse bestätigen die Überlegungen zur Bedeutung der IKT. So wurden erkennbare Reduzierungen der betrachteten Parameter in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“ erst dadurch erreicht, dass das Verkehrsaufkommen im motorisierten Individualverkehr (MIV) aufgrund eines veränderten Modal-Split niedriger angesetzt werden konnte. Grundlage dieser Veränderungen im Mobilitätsverhalten sind auch die (IKT-basierten) neuen Verkehrsdienstleistungen. IKT stellt demnach grundsätzlich eine wichtige Grundlage für den Einsatz anderer Technologien (z. B. Smart Grid) oder Anwendungen (z. B. Ridesharing) dar.

Aus diesen Ergebnissen und Reflektionen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

### Empfehlungen

**E9**: Bei der Bewertung von technischen Optionen zur Umgestaltung von Infrastrukturen sollten erforderliche und möglich werdende Verhaltensänderungen in den Blick genommen werden. Dies umfasst auch die Antizipation möglicher Ausweichreaktionen auf angestrebte Veränderungen der Infrastrukturnutzung.

**E10**: Um durch Infrastruktur ressourcenleichte Verhaltensweisen nicht nur zu ermöglichen, sondern tatsächlich zu fördern, sollten Steuerungs- und Lenkungsinstrumente eingesetzt und Anreize für die Nutzenden geschaffen werden (zusätzliche positive Effekte die größer sind als ggf. vorhandene negative Auswirkungen).

**E11**: Wird durch die Infrastrukturgestaltung ein verändertes Verhalten möglich, müssen auch mögliche Rebound-Effekte[127] erkannt und berücksichtigt werden.

### Adressaten der Empfehlungen

Die Empfehlung zur Bewertung technischer Optionen (E9) richtet sich in erster Linie an kommunale Akteure, Unternehmen (Betreiber) und Verbände (Standards, Normen). Das Setzen von Anreizen durch geeignete Förderinstrumente (E10) ist eine Aufgabe für Politik und Verwaltung aller staatlichen Ebenen. Die Auseinandersetzung mit möglichen Rebound-Effekten (E11) erfordert in besonderer Weise die Erfahrungen und das Know-how der Unternehmen, die Infrastruktursysteme bereitstellen und/oder betreiben. Die Empfehlungen dieses Handlungsfeldes betreffen alle Infrastruktursektoren gleichermaßen.

### Maßnahmen und Instrumente

- Förderung wissenschaftlicher Analysen:
  Um die mit einer veränderten Infrastrukturgestaltung verbundenen erforderlichen oder mög-

127 Eine bezogen auf eine Nutzungseinheit ressourcenleichtere Nutzung kann zu einer Ausweitung der Nachfrage und damit im Ergebnis zu mehr Ressourceninanspruchnahme führen.

lichen Verhaltensänderungen besser bewerten zu können, müssen diese erst einmal bekannt sein. Dazu ist systematische Forschung erforderlich, die mit dem Ziel einer ökologischen Optimierung nicht nur die technischen Dimensionen von Infrastruktursystemen betrachtet, sondern auch gesellschaftliche und soziale Aspekte berücksichtigt. Durch einen entsprechenden Ausbau bzw. die inhaltliche Erweiterung der Forschungsförderung für ökologisches Design und smarte Anwendungen könnte insbesondere die staatliche Ebene (Bund und Länder) hier wichtige Impulse geben.

- Kommunikation positiver Effekte:
  Schon vor der aufwändigen Umgestaltung von Infrastrukturen ist eine Auseinandersetzung mit den Bedürfnissen und Anforderungen der zukünftigen Nutzenden erforderlich. Nur so kann erreicht werden, dass der gesellschaftliche Vorteil geringer Ressourceninanspruchnahme mit individuellen positiven Effekten einhergeht. Der mit der Umgestaltung verbundene Zusatznutzen für das Gemeinwohl sollte einen angemessenen Platz in der Kommunikation zu entsprechenden Vorhaben finden. Über temporäre Umnutzungen können positive Effekte (Zusatznutzen) für die Menschen erfahrbar gemacht werden. So werden bei sog. Parkingdays die Stellplätze in öffentlichen Straßen für einen Tag einer anderen Nutzung zugeführt, beispielsweise als Straßengrün, Schankgärten, Pocketparks, Spielplätze usw.
- Verringerung finanzieller Hemmnisse:
  Ein wesentliches Umsetzungshemmnis kann entstehen, wenn auf Seiten der Nutzenden eigene Maßnahmen erforderlich werden, um ressourcenleichte Infrastruktur nutzen zu können. Insbesondere damit verbundene finanzielle Belastungen verschlechtern das erwartete Kosten-Nutzen-Verhältnis. Hier kann mit der Nutzung fiskalischer Instrumente entgegengewirkt werden, wie etwa einer Anpassung der Abschreibungszeiten bei Investitionen in besonders effiziente Infrastrukturkomponenten (z. B. BHKW).
- Durchsetzung unter Berücksichtigung von Akzeptanz:
  In der Praxis insbesondere auf der lokalen Ebene (Kommunen) besteht prinzipiell auch die Möglichkeit, die Nutzung ressourcenleicht gestalteter Infrastrukturen mit Hilfe entsprechender Satzungen zum Anschluss- und Benutzungszwang vorzugeben. Dies erscheint in den Bereichen unproblematisch, in denen heute schon entsprechende Regelungen zur Anwendung kommen (z. B. Abwasserentsorgung, Wärmeversorgung). Auf Basis von Verträgen zwischen Kommune und Investoren können Maßgaben und Rahmenbedingungen definiert werden, die Möglichkeiten für ressourcenleichte Infrastrukturen eröffnen und positive Wirkungen zeitigen können. Beispielsweise können in Verträgen mit Immobilieninvestoren Bedingungen für ein ressourcenleichtes Regenwassermanagement, Abwasserkonzepte, Energieversorgungssysteme und Mobilität im Quartier definiert werden. Allerdings sind solchen Instrumenten aufgrund technischer Aspekte, rechtlicher Rahmenbedingungen und aus Akzeptanzgründen auch Grenzen gesetzt.
- Sanktionen und negative Anreize:
  Auch negative Anreize und der Einsatz des Ordnungsrechts sind Wege, Verhalten steuernd zu beeinflussen. Dabei kann beispielsweise die Preisgestaltung ein lenkendes Mittel sein, welches für die Nutzenden unmittelbar spürbar ist. Allerdings ist die Effektivität nicht immer gegeben, da häufig kein grundsätzliches Umdenken erreicht wird. Außerdem sind hier preis- und gebührenrechtliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen.
- Schaffen von Tatsachen als Ausnahme:
  Ferner sollte abgewogen werden, wann und in welchen Kontexten Steuerung auch durch das „Schaffen von Tatsachen“ wirksam sein kann. Dies gilt es gleichwohl gut abzuwägen, denn Infrastrukturausbau ohne Partizipation kann auch negative Folgen etwa mit Blick auf Akzeptanz haben, sodass die gewünschten Effekte nicht eintreten. Grundsätzlich sind multiple Ansätze notwendig, die sowohl sozio-kulturelle und planerische als auch „harte“ rechtliche und ökonomische Faktoren einbeziehen.

- Unterstützung nachhaltiger Handlungsalternativen:
  Unabhängig vom konkreten Vorgehen sollte eine geplante Einschränkung von Verhaltensweisen mit hoher Ressourceninanspruchnahme, z. B. im Bereich Straßenverkehr durch die Einführung einer City-Maut in Großstädten für Pkw und Lkw oder Stellplatzreduzierungen, stets mit der Unterstützung des nachhaltigen Verhaltens (z. B. der Nutzung des Umweltverbunds im Nahverkehr) einhergehen. Beispiele hierfür sind die Einführung intermodaler Mobilitätskarten (vgl. BPB Stuttgart), die Verbesserung von Angebot und Komfort im ÖPNV sowie die Schaffung von sicheren und attraktiven Wegen und Verbindungen für den Fuß- und Radverkehr. Durch dieses „push and pull" kann ressourcenleichtes Verhalten nicht als Verzicht, sondern als Bereicherung wahrgenommen werden.
- Differenzierte Ansätze:
  Bei Maßnahmen und Vorschlägen zu Verhaltensänderungen sind die Besonderheiten der Infrastruktursysteme zu beachten. Bei den Straßeninfrastrukturen sind andere Maßnahmen möglich und nötig, als dies etwa bei Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen der Fall ist. Zu berücksichtigen ist dabei, dass sowohl Verkehr als auch die Wasserversorgung wichtige Lebensbereiche der Menschen betreffen und hochgradig emotional aufgeladen sind. So können Fragen der Veränderung und Einführung neuer Wasserinfrastrukturen heikel werden, wenn es bei Trinkwasser um die Hygiene eines fundamentalen Lebensmittels geht.

## 2.5 Handlungsfeld: Dilemma aus Flexibilität und Sicherheit akzeptieren: Planung, Umsetzung und Technik

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Die bisherige Analyse hat gezeigt, dass Bedarfsschätzungen in Bezug auf einzelne Infrastrukturteilsysteme und die damit verbundenen Angebote häufig weit neben der tatsächlichen Entwicklung liegen können. Annahmen über die künftige Entwicklung von Rahmenbedingungen der Infrastrukturentwicklung (u.a. Demografie, BIP, räumliche Entwicklungen) sowie spezifische Entwicklungen einzelner Infrastrukturteilsysteme (u.a. Technologiepfade, Kostenentwicklungen etc.) sind mit (mehr oder weniger) großen Unsicherheiten behaftet.[128] Tendenziell treibend auf den Ressourcenverbrauch wirken auch (quantitative) Richtlinien, Normen und Standards, mit denen z. B. die Dimensionierung und Auslegung von technischen Systemen bestimmt werden. Diese Werte helfen einerseits, Planungen zu objektivieren, basieren andererseits auf vergangenheitsbezogenen Wertvorstellungen, Erfahrungen oder Bezugsgrößen der infrastrukturellen Auslastung, die in Anbetracht veränderter Rahmenbedingungen oder technologischer Entwicklungen nicht mehr angemessen sein können.

Darüber hinaus besteht zum Teil eine große Unsicherheit bezüglich der zukünftig zur Verfügung stehenden Technologien. Dies wurde beispielsweise für das Infrastrukturteilsystem Strom als Schwäche im Rahmen der SWOT-Analyse abgebildet. Demgegenüber wurden die hohe Innovationsdynamik und die schnelle Entwicklung von (neuen) Märkten im Energiesektor und der IKT-Infrastruktur auch als positiv angesehen. Allerdings bringt diese Dynamik ebenfalls ein hohes Maß an Unsicherheit mit sich.

Unsicherheit führt dazu, dass Entscheidungen erschwert und möglicherweise suboptimale Pfade eingeschlagen werden. Bei langfristigen Plänen ergeben sich schon in der Planungsphase bzw. aufgrund der schrittweisen Realisierung von Plänen „Pfadabhängigkeiten". Dies gilt beispielsweise bezüglich der Entscheidung für eine dezentral oder zentral ausgerichtete Struktur.

Vor diesem Hintergrund war es zum Teil schwierig, die im Rahmen der orientierenden Stoffstromanalyse erforderlichen Annahmen über technologische Entwicklungen und andere Trends zu treffen. Der

128 Daher wurden entsprechende Sensitivitätsanalysen durchgeführt (vgl. Teil C Kapitel 8.2).

im Vorhaben gewählte Szenarioansatz ist eine Möglichkeit, analytisch mit Unsicherheiten umzugehen. Für Planungs- und Entscheidungsprozesse bleibt dieser Aspekt trotzdem eine Herausforderung.

Aus Ergebnissen und Reflektionen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

### Empfehlungen

**E12**: Das Dilemma aus erforderlicher Planungssicherheit für Investitionsentscheidungen und deren Umsetzung einerseits und andererseits möglichst weitgehender Flexibilität in Bezug auf sich verändernde Entscheidungsgrundlagen sollte akzeptiert und in geeignete Instrumente im Rahmen von Planungs- und Umsetzungsprozessen von Infrastrukturmaßnahmen im Sinne einer flexiblen, sich anpassenden Entwicklungsplanung übersetzt werden.

**E13**: Planungsprozesse sollten zukünftig auch Abbruchkriterien bzw. Indikatoren für notwendige Pfadänderungen definieren, mit denen auf besonders drastische Veränderungen der Rahmenbedingungen und Anforderungen reagiert werden kann.

**E14**: Richtlinien, Normen und Standards sollten systematisch in Hinblick auf deren Wirkung auf Ressourcenverbrauch überprüft werden. Der Bund könnte durch Förderung der Forschung in diesem Bereich mit dem Ziel der Erstellung von Empfehlungen und der Anpassung der Regelwerke an den Stand der Technik einen wichtigen Beitrag leisten.

### Adressaten der Empfehlungen

Flexibilität in der Entwicklungsplanung (E12) ist insbesondere durch Kommunen und Unternehmen zu gewährleisten. Die Definition von Abbruchkriterien (E13) ist eine Frage, die in besonderer Weise die staatlichen Akteure aller Ebenen betrifft. Der Bund wurde als Akteur bei der Förderung von Forschung und der darauf basierenden Setzung von Normen und Standards (E14) bereits benannt. Die Empfehlungen in diesem Handlungsfeld beziehen sich auf alle Infrastruktursektoren.

### Maßnahmen und Instrumente

- Reduzierung von Unsicherheit:
  Aus technischer Perspektive kann Unsicherheit durch eine Bevorzugung möglichst flexibler, polyvalenter Systeme und modularer Strukturen reduziert werden.
- Einführung von Prüfverfahren und Erschließung von Handlungsalternativen:
  Mit Blick auf Planungsprozesse und die empfohlene Verankerung von Abbruchkriterien (die selbstverständlich im Rahmen regelmäßiger Evaluationsprozesse bewertet werden müssen) sollten ergänzend und mit Blick auf den weiteren Umgang mit den Konsequenzen eines Projektabbruchs Prüfverfahren und Möglichkeiten eingeführt werden, begonnene Infrastrukturvorhaben entweder umzuplanen oder gar einzustellen. Zum Teil existieren entsprechende Vorgänge bereits in der Praxis. Darüber hinaus sollte über Möglichkeiten der Umwidmung bewilligter Fördergelder in modifizierte bauliche Umsetzungen nachgedacht werden und es sollten ggf. Möglichkeiten der (Sonder-)Abschreibung „fehlgeplanter“ Vorhaben nach dem Motto „Lieber ein Ende mit Schrecken als ein Schrecken ohne Ende“ geschaffen werden.
- Bevorzugung von Optionen mit variablen Nutzungsmöglichkeiten:
  Als weitere Maßnahme können vorzugsweise „No- bzw. Low-Regret-Maßnahmen“ in der Planung von Infrastrukturvorhaben ergriffen werden; Maßnahmen also, die man auch bei Nichteintritt der zugrunde gelegten Rahmenbedingungen und angenommenen Trends nicht bzw. kaum bereut und die auch bei unsicherer Datenlage sinnvoll sind. Eine Variante davon sind Multi-Purpose-Maßnahmen, die beim Ausbleiben eines ursprünglich erwarteten Bedarfs noch weitere parallele oder alternative Nutzungsmöglichkeiten bieten und damit die Umsetzung der Maßnahme begründen.

- Stabilisierung der energiepolitischen Ausrichtung:
  Für den Energiesektor sind mit Blick auf das Dilemma aus Flexibilität und Sicherheit die zahlreichen Novellierungen der energierelevanten Gesetze (EEG, EnWG, KWKG) eine Herausforderung. Denn gerade aus Sicht von Unternehmen ändern sich die Rahmenbedingungen für Investitionsentscheidungen innerhalb der Abschreibungszeiträume von Anlagen, was zu Unsicherheiten und betriebswirtschaftlichen Risiken führt. Aus Sicht der Unternehmen wäre eine langfristig stabile energiepolitische Ausrichtung hilfreich.

## 2.6 Handlungsfeld: Noch stärker als bisher auf integrierte Lösungen setzen

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Die SWOT-Analysen der verschiedenen Infrastruktursektoren dokumentieren vielfältige Ansatzpunkte für Sektorkopplungen. In der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ wurde eine Reihe von Kopplungsoptionen skizziert und – soweit im Rahmen dieses Vorhabens möglich – modelliert. Die bereits heute bestehenden, sich absehbar entwickelnden und denkbaren Sektorkopplungen (Strom, Gas, Wärme, Abwasser, Verkehr) bieten durchaus Potenziale für mehr Ressourcenleichtigkeit in der Gesamtheit der Infrastruktursysteme. Die Ergebnisse der Stoffstromanalysen zeigen aber auch, dass diese Potenziale mit Blick auf den Infrastrukturbestand begrenzt sind und der Betrieb und die Nutzung der Infrastrukturen sehr wirkmächtig sind. Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse der Stoffstromanalyse der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ von Interesse, da hier aufgrund der gebündelten Maßnahmen zur Reduktion des Verkehrsaufwands und damit einer Reduktion des Ausbaubedarfs der Verkehrsinfrastruktur gegenüber dem Referenzszenario eine Verringerung der Ressourceninanspruchnahme belegt werden kann. Für eine ressourcenleichte Gestaltung der Infrastruktur sollten verschiedene „Bausteine“ miteinander kombiniert werden (wie Szenarette 2 verdeutlicht), was integrierte und sektorenübergreifende Lösungsansätze voraussetzt.

Neben der Frage nach den (quantitativen) Effekten in Bezug auf Ressourceninanspruchnahme können integrierte Ansätze Vorteile in den untersuchten qualitativen Dimensionen bieten, wenn sich Bewertungen von gekoppelten Infrastruktursystemen z. B. hinsichtlich ihrer Flexibilität und Resilienz verbessern.

Nicht explizit untersucht, in der Literatur jedoch vielfach diskutiert und belegt, ist der Zusammenhang zwischen Siedlungsentwicklung und Verkehrsinfrastrukturen (Verron et al. 2005) (Arndt et al. 2011). Siedlungsstrukturen sowie Siedlungsdichten beeinflussen in hohem Maße Möglichkeiten der Gestaltung des lokalen Modal-Split etwa durch die Attraktivität des ÖPNV und Fahrradverkehrs und alternative Mobilitätsangebote. Siedlungsdichten sind für nahezu alle technischen netzgebundenen Infrastruktursysteme eine wichtige Rahmengröße, insbesondere sind sie für die technische Planung (z. B. die Dimensionierung) von Wärmeversorgungs- und Abwasserinfrastrukturen relevant.

Technische Lösungen zur Umsetzung von Sektorkopplungen beruhen häufig auf bestimmten technischen Voraussetzungen. Beispielsweise erfordert die Umsetzung der Kopplung von Abwasserwärme und Wärmeversorgungsnetzen wechselseitige Anpassungen. Wärmenetze müssen in diesem Fall auf Niedertemperatur gefahren werden, um Abwasserwärme einspeisen zu können. Wegen der Niedertemperatur-Wärmeversorgung sind in den Wohnungen jedoch die Heizungsinstallationen umzustellen etwa auf Fußbodenheizungen. Und Wärmenetze setzen grundsätzlich bestimmte bauliche Dichten und Wärmesenken-Potenziale voraus, um wirtschaftlich und ökologisch effizient betrieben werden zu können. Dieses Beispiel macht den Zusammenhang zwischen öffentlicher und privater Infrastruktur deutlich. Darüber hinaus zielen integrierte Lösungen nicht nur auf Kopplungen, sondern auch auf eine systematische Abstimmung, welches Versorgungssystem bevorzugt werden sollte. Damit werden unproduktive und letztlich den Ressourcenverbrauch antreibende Konkurrenzen vermieden. Diese Argumente verweisen auf die Notwendigkeit, Siedlungs- und Infrastrukturplanung integriert zu betrachten. Zwar ist in BauGB, ROG bzw. den entsprechenden Fachplanungsgesetzen durch das Abwägungs-

gebot ein integrativer Ansatz fixiert. In der Planungspraxis (z. B. Raumplanung und Planfeststellungsverfahren) erweist sich der Anspruch einer integrativen Planung jedoch als nicht einfach umsetzbar. Einzelne Best-Practice-Beispiele legen interessante Ansätze integrierter räumlicher Planung dar (vgl. Teil D, Beispiele aus Salzburg und Stockholm). Integrierte Planung mag zwar für die Akteure eine große (fachliche, kognitive, kulturelle) Herausforderung darstellen, in integrierten Ansätzen lassen sich jedoch neue Lösungen besser entwickeln und Komplexität bearbeiten.

**Empfehlungen:**

**E15**: Auf den verschiedenen räumlichen Ebenen und sektorbezogenen Fachplanungen sollte noch stärker als bisher nach Verfahren und Strukturen gesucht werden, wie integrierte Ansätze in Planungsverfahren und bei Entwicklungsprozessen gefördert werden können. Nicht zuletzt die Erfahrungen aus kommunalen Energieleitplänen oder dem Stadtumbau Ost zeigen, dass sich durch eine frühzeitige Abstimmung von Entwicklungsprozessen zwischen städtischen Akteuren optimierte Infrastrukturlösungen schaffen lassen.

**E16**: Bei der Suche nach „integrierten Lösungen“ sollte neben einer Auseinandersetzung mit den technischen Erfordernissen auch eine intensive Befassung mit den erforderlichen Governance-Strukturen, d. h. dem Zusammenspiel der relevanten Akteure in Planung und Betrieb der Infrastrukturen, erfolgen.

**E17**: Integrierte Ansätze in Planungsverfahren leben von der Vielfalt der Sichtweisen, Kenntnisse und Interessen der Akteure. Diese gilt es wertzuschätzen (auch wenn es manchmal „schwierig ist“). Hier sind intelligente Beteiligungs- und Mediationsverfahren wichtige Werkzeuge.

**Adressaten der Empfehlungen**

Die genannten Empfehlungen richten sich in erster Linie an Politik und Verwaltung auf der kommunalen Ebene in Bezug auf die Weiterentwicklung von infrastrukturellen Fachplanungen (E15) und die Suche nach integrierten Lösungen (E16) in spezifischen lokalen räumlichen Kontexten. Zusätzlich sind bei überregionalen Infrastrukturvorhaben die Planungsbehörden der Länder und Kommunen im Verbund mit Unternehmen in Bezug auf Entwicklung und Einsatz von Beteiligungs- und Mediationsverfahren (E17) angesprochen. Durch den Anspruch einer integrierten Herangehensweise sind die Empfehlungen für alle Infrastruktursektoren relevant.

**Maßnahmen und Instrumente**

- Kopplung und Erschließung von Kreisläufen:
  Beispiele aus dem Pool der BPB (Stockholm, Prenzlau, Ludwigshafen, Berlin) zeigen, dass eine sektorenübergreifende Planung und Umsetzung von Infrastrukturmaßnahmen möglich ist und damit z. B. neue Formen der Kopplung und des Erschließens von (stofflichen) Kreisläufen ermöglicht werden.
- Sektorenübergreifende Berücksichtigung vorhandener Infrastrukturen:
  Im Zuge der integrierten Planung und der Abwägung bei der Etablierung neuer Infrastrukturen sollten auch die bereits vorhandenen Infrastrukturen sektorenübergreifend analysiert und planerisch einbezogen werden. Oftmals ergeben sich daraus neue Lösungen und Ansatzpunkte, Infrastruktursysteme zu koppeln und damit etwa Stoffströme integriert zu behandeln und im Sinne von Kreisläufen zu denken (vgl. BPB Stockholm, Prenzlau, Ludwigshafen, Kopenhagen, Berlin).
- Förderung kommunaler und regionaler Mobilitätskonzepte:
  Für den Verkehrsbereich belegen die in Teil D systematisierten Beispiele aus Kopenhagen (Ausbau der Radinfrastruktur und Priorisierung des Radverkehrs), Stockholm (Verkehrssteuerung in Kombination mit Gebühren für die Pkw-Fahrt ins Stadtzentrum) und Utrecht (Umwelt-

zone in Kombination mit Gewichtsbeschränkungen für den Güterverkehr), welche Möglichkeiten der Förderung kommunaler und regionaler Mobilitätskonzepte für Warenverkehr, MIV (z. B. Pendler) mit Fokus auf ressourcenleichte Systeme (Vermeidung, Fahrrad, Elektromobilität) bestehen.

- Schaffung einer geeigneten Datengrundlage:
  Wichtige Voraussetzung integrierter Lösungsansätze ist eine geeignete Datengrundlage. Diese ist häufig noch nicht bzw. nicht in ausreichender Tiefe und Genauigkeit vorhanden und muss in Form von Anlagenverzeichnissen, Katastern usw. erst geschaffen werden.
- Verknüpfung sektoraler und gesamträumlicher Planung:
  Sektorale Planungen und gesamträumliche Planungen müssen besser verknüpft werden. Auf kommunaler Ebene sollten Stadtentwicklungs- und Infrastrukturplanung frühzeitig verzahnt werden, sodass Infrastrukturplanungen nicht erst im Nachhinein Gebiete städtebaulicher Planungen erschließen.

## 2.7 Handlungsfeld: Rohstoffe – Kreislaufwirtschaft fördern – Umweltfolgen verringern

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Die Ergebnisse in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“ weisen darauf hin, dass durch Maßnahmen der Kreislaufwirtschaft (Recycling) für die Baumaterialien der Infrastrukturen Potenziale für mehr Ressourcenleichtigkeit enthalten sind. Die verstärkte Verwendung von Sekundärmaterial (z. B. Asphalt, Kupfer) und die Erhöhung der Nutzungsdauern können helfen, die jährlichen Auswirkungen zu reduzieren. Dieser Aspekt ist von besonders hoher Relevanz, weil sich Potenziale nicht allein in sich verändernden, d. h. in Umbau befindlichen, Infrastrukturbeständen auswirken, sondern fast der gesamte Bestand auch in der Phase der Instandhaltung und Erneuerung adressiert wird. Beispielsweise kann Recyclingasphalt schon im existierenden Straßenbestand eingesetzt werden und nicht allein bei einer Netzerweiterung. Dadurch ergibt sich ein großes Minderungspotenzial, insbesondere in Hinblick auf den kumulierten Energieaufwand. Den Einsatz von Sekundärrohstoffen und -baustoffen zu forcieren und nutzungsdauerverlängernde Maßnahmen umzusetzen, ist hinsichtlich der betrachteten Parameter KRA, KEA und THG-Emissionen von hoher Bedeutung.

Der KRA als mögliches Maß für die Ressourcenleichtigkeit hat jedoch nur begrenzt Aussagekraft bzgl. der Umweltwirkungen, denn er sagt nichts über die Knappheit oder Umweltrelevanz von Rohstoffen aus. Eine kritische Betrachtung gilt es daher insbesondere mit Blick auf den IKT- und Energie-Sektor (z. B. PV-Module, Batteriespeicher) und potenzielle Konflikte um (seltene) Rohstoffe zu führen. Für die Bewertung sind insbesondere rohstoffspezifische Zielgrößen bezogen auf diese Parameter erforderlich. Hierüber lässt sich auch die in der SWOT-Analyse des IKT-Sektors als Risiko identifizierte Verknappung strategischer Rohstoffe adressieren, die noch dazu in Konkurrenz zu Technologien im Bereich Erneuerbare Energien münden kann.

Solange die Kosten, die Nutzungseigenschaften von Produkten und die Infrastrukturkomponenten aus Sekundärrohstoffen mit denen aus Primärmaterial vergleichbar sind, kann von einer insgesamt hohen gesellschaftlichen Akzeptanz ausgegangen werden, da die Nutzung von Recyclingmaterial als ökologisch vorteilhaft wahrgenommen wird. Allerdings ist die Akzeptanz von Recyclingmaterialien bei verantwortlichen Entscheidungsträgern zum Teil auch gering ausgeprägt. Insbesondere für Recyclingbeton im Hochbau wird häufig die Produkthaftung als Hindernis für dessen Einsatz angeführt. Die erforderlichen Güten, Maßnahmen der Qualitätssicherung und Kontrollmechanismen scheinen hier entweder nicht umfänglich bekannt zu sein oder als nicht hinreichend angesehen zu werden.

**Empfehlungen:**

**E18**: Recycling von Baustoffen und Materialen in Infrastruktursystemen bringt erhebliche Effekte für Ressourcenleichtigkeit. Es sollte daher in allen Sektoren und Infrastrukturkomponenten konsequent, auch mit Blick auf kritische/seltene Materialien, ausgebaut werden.

**E19**: Eine Erhöhung der Recyclingquote für Baustoffe und Materialen von Infrastruktursystemen könnte etwa durch finanzielle Anreize für deren Verwendung, die Ausweisung als Kriterium in den „Terms of Reference" öffentlicher Ausschreibungen, den Aufbau von (regionalen) Sekundärrohstoff-Märkten oder von Normierungen zur Sicherung von Qualitäten unterstützt werden.

**Adressaten der Empfehlungen**

Maßnahmen zum Recycling von Baustoffen und Materialien (E18) können in besonderer Weise durch die Unternehmen, die Infrastruktursysteme errichten und bereitstellen, umgesetzt werden. Im Verkehrsbereich ist ein besonders hohes Potenzial hierfür vorhanden, prinzipiell ist Recycling jedoch für alle Infrastruktursysteme relevant. Die Empfehlung einer Förderung von Maßnahmen mit dem Ziel einer höheren Recyclingquote, auch im Rahmen von Ausschreibungen (E19), richtet sich in erster Linie an Kommunen. Auch hier sind alle Infrastruktursysteme adressiert. Die Förderung der Materialforschung spricht den Bund an. Der Gesetzgeber, mit seinem Instrument der rechtlichen Vorgaben, sowie die zahlreichen Fachverbände in den Infrastruktursektoren sind adressiert, wenn es darum geht, laufend die Normen und Standards „guter fachlicher Praxis" und den „Stand der Technik" in ihren Regelwerken zu definieren.

**Maßnahmen und Instrumente**

- Förderung Materialforschung:
  Eine mögliche konkrete Maßnahme zur praktischen Umsetzung der Empfehlungen ist die Förderung von Programmen der (Material-)Forschung mit dem Ziel, eine weitere Verbesserung der Qualität der Sekundärrohstoffe etwa durch eine Optimierung der Verfahren zu erreichen und damit zur Reduzierung der jeweiligen Umweltfolgen beizutragen.[129] Für in neuartigen Infrastrukturkomponenten eingesetzte seltene oder kritische Metalle oder seltene Erden wie z. B. in Batteriespeichern sollte parallel zum Markthochlauf bereits die Forschung zu Nachnutzungskonzepten und Recyclingverfahren gefördert werden, um mittelfristig einerseits die Umweltfolgen der Förderung zu minimieren und andererseits die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Eine weitere Maßnahme ist in der Umsetzung der Forschungsergebnisse in Pilotvorhaben zu sehen. Die so gesammelten Erkenntnisse sollten außerdem in den übergreifenden Fachdiskurs zurückgespielt werden und darüber hinaus in die Ausbildungsinhalte der betreffenden Fachrichtungen einfließen.
- Entwicklung und Anpassung von Normen:
  Ein wichtiges Maßnahmenfeld liegt außerdem in der Entwicklung und Anpassung der Normen zur Aufbereitung und Verwendung von Sekundärrohstoffen im Hoch- (RC-Beton) und Tiefbau (Asphalt). Ziel sollte es sein, durch Normung und eine laufende Fortschreibung des „Stands der Technik" mehr (Rechts-)Sicherheit für die Kunden und Anbieter auf den Märkten zu schaffen. Auf dieser Grundlage können einfacher als bisher Ansätze der Kreislaufwirtschaft bzw. des Recycling gefördert werden, indem beispielsweise Mindestvorgaben für die Verwendung von Recycling-Material im Tief- und Hochbau bei öffentlichen Ausschreibungen gemacht werden (vgl. BPB Baden-Württemberg, Berlin, Stockholm, Zürich). Entsprechende Vorgaben könnte auch im Rahmen der Bauleitplanung oder bei städtebaulichen Verträgen formuliert werden.

129 Ein Beispiel ist das Ufoplan-Vorhaben „Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen", das 2016 wegen der Arbeiten zum Einsatz von RC-Beton mit dem Umweltpreis bedacht wurde (vgl. http://www.rbb-online.de/panorama/beitrag/2016/10/umweltpreis-geht-auch-nach-brandenburg.html).

## 2.8 Handlungsfeld: Energiewende beschleunigen und Kohleausstieg forcieren

### Ergebnisse der bisherigen Analyse

Mit der Energiewende hat sich Deutschland eine Transformation seines Energiesystems vorgenommen. Solche Transformationen laufen nicht ohne Widersprüche und Konflikte ab. Und erkennbar sind im Konzert widerstreitender Interessen und eigendynamischer Entwicklungen Förderinstrumente (EEG, KWK-G), Kostenstrukturen (z. B. sind bei den aktuellen Preisen für $CO_2$-Zertifikate die Kosten bei der Verstromung des vergleichsweise umweltfreundlichen Erdgases gegenüber Braunkohle auf absehbare Zeit nicht konkurrenzfähig) und Marktdesign (Kapazitätsmarkt, Systemdienstleistungen) nicht immer kohärent aufeinander abgestimmt bzw. konnten notwendige Maßnahmen und Instrumente nur partiell umgesetzt werden. Zum Teil werden im Zuge der periodischen Anpassungen der Förderinstrumente auch unklare Signale an die Akteure zur weiteren Richtung der Transformation gesendet.

Die Ergebnisse der Stoffstromanalyse zeigen, dass durch den Rückbau der mit fossilen Energieträgern betriebenen Anlagen der Infrastrukturbestand in seiner Nutzung merklich ressourcenleichter wird, indem der veränderte Strommix für den Betrieb der Infrastruktursysteme in den Bilanzen durchschlägt. Der Ausbaupfad von EE-Erzeugungsanlagen schlägt auch auf die anderen Infrastrukturbereiche durch. Insbesondere in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen“ sind Maßnahmen der Sektorkopplung wie das Abschöpfen von Abwärme aus Abwasser und Power-to-Heat/Gas angelegt, die den fossilen Kraftwerkspark reduzieren können. Ein schnellerer Rückgang an fossilen Erzeugungsanlagen führt in den Fallbeispielen zu einer akkumulierten Emissionsminderung von 40 bis 90 Mio. t $CO_2$-Äquivalenten. Um diese wegfallenden fossilen Anlagen vergleichsweise ressourcenleicht zu ersetzen, ist ein beschleunigter Ausbau von EE-Anlagen erforderlich.

### Empfehlungen:

**E20**: Neben dem Ausstieg aus der Kernenergie sollte nun auch der Ausstieg aus der Kohle konsequent und möglichst zügig angegangen werden.

**E21**: In der Abwägung der mit einem forcierten Ausbau von EE-Anlagen notwendigen Flexibilitätsoptionen (Stromnetzausbau, Einspeise- und Lastmanagement, Smart Grids, verschiedene Speicher) sollte neben den gängigen Kriterien wie Systemstabilität, Sicherheit, Kosten etc. auch die Ressourceninanspruchnahme (Rohstoffe, Energie, THG, Fläche) durch Bau, Betrieb und Unterhalt der Infrastruktursysteme berücksichtigt werden.

**E22**: Neue Anlagen sollten da errichtet werden, wo dies mit Perspektive auf die Übertragungsnetze sinnvoll ist. Bei der Auswahl von Standorten sollten zudem Kriterien wie Zersiedlung und Landschaftsbeeinträchtigung berücksichtigt werden.

### Adressaten der Empfehlungen

Die genannten Empfehlungen betreffen insbesondere den Energiesektor. Dabei können beim Kohleausstieg (E20) alle Akteure einen Beitrag leisten: Gesetzgeber, Verbände, Unternehmen, Bürger bzw. Kunden. Die Auseinandersetzung mit verschiedenen Flexibilitätsoptionen (E21) erfordert einerseits staatliche Initiative und andererseits eine Einbindung der Unternehmen im Energiesektor. Bei der Auswahl der Standorte von EE-Anlagen (E22) kommt Bund, Ländern und Kommunen eine besondere Rolle zu.

### Maßnahmen und Instrumente

- Erhöhung der EE-Ausbauziele:
  Konkret sollten für eine Gestaltung ressourcenleichter Infrastruktursysteme bei der nächsten Novellierung des EEG die Ausbauziele für erneuerbare Energien erhöht und Flexibilitätsoptio-

nen berücksichtigt werden, um einen beschleunigten Ausstieg aus der Kohlewirtschaft zu ermöglichen. Dabei sollten der Gesetzesrahmen (u.a. EEG, StrommarktG, KWK-G, Verordnungen) und die im Gesetzesrahmen angelegten Vergütungs- und Anreizstrukturen so gestaltet werden, dass sich die verschiedenen Flexibilitätsoptionen mit Blick auf Klimaschutz, Ressourceninanspruchnahme, Versorgungssicherheit und volkswirtschaftliche Kosten optimal entwickeln können. Neben dem Lastmanagement kann die Umwandlung von Strom, der nicht für originär elektrische Anwendungen gebraucht wird, in PtX eine Option darstellen, Unterschiede zwischen Stromerzeugung und Bedarf auszugleichen. So könnten PtG- und PtH-Anlagen, die überschüssigen Strom aus dem Netz aufnehmen, von der Netzgebühr befreit werden. Damit würde verhindert, dass es z. B. für Windkraftanlagen-Betreiber günstiger ist, die Anlage abzustellen und damit deren Auslastung zu senken, als Strom in die Umwandlung in andere Energieträger zu geben.

- Steigerung der Energieeffizienz:
  Um die Nachfrage nach Energie zu senken, sind in allen Anwendungsbereichen (Haushalte, Gewerbe, Industrie, Verkehr) weitere Anstrengungen zur Steigerung der Energieeffizienz geboten. Der Bund kann hier nicht nur mit Forschungs- und Förderprogrammen Impulse setzen, sondern auch verschärfte Vorgaben zu Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von elektrischen Geräten machen (vgl. Handlungsfeld IKT, E26). Dabei darf der Verkehrssektor nicht ausgespart bleiben.
- Förderung energetischer Quartierssanierung:
  Um die Nachfrage nach Energie (insb. Wärme) zu senken, sollten Programme zur Förderung der energetischen Quartierssanierung (z. B. KfW) gezielt auf Dekarbonisierung ausgelegt werden.
- Netz-Optimierung für erneuerbare Energien:
  Netzausbau und Netzbetrieb sollten so optimiert werden, dass mehr erneuerbare Energien integriert werden können.
- Förderung von Pilotprojekten der Sektorkopplung:
  Visionäre Pilotprojekte zu neuen Kopplungen sind ebenfalls wichtig. Praktische Beispiele finden sich in den BPB aus Prenzlau, Feldheim, Ludwigshafen, Berlin, München. Mittelfristig sollten diese Kopplungen sich nicht am Eigenverbrauch, sondern an der Stromnachfrage in Deutschland orientieren.

## 2.9 Handlungsfeld: Bei der Infrastrukturplanung die Flächenpotenziale berücksichtigen

### Ergebnisse der bisherigen Analyse

Die Stoffstromanalysen haben das bereits in der SWOT-Analyse konstatierte Bild der enormen Flächeninanspruchnahme durch Verkehrsinfrastruktur absolut und im Vergleich zu den anderen Sektoren bestätigt. Auch in den anderen Sektoren ist die Inanspruchnahme von Fläche und Flächennutzungskonkurrenzen durchaus ein Thema – etwa beim Anbau von Biomasse oder Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen.

In der Fallstudie „Innovationen im Verkehrsbereich“ ergeben sich durch die Verlagerung weg vom Motorisierten Individualverkehr gerade in Städten Potenziale, Flächen im Straßenraum anderweitig zu nutzen. Eine Umwidmung dieser Verkehrsflächen ermöglicht neue, ressourcenleichte Flächennutzungen, z. B. durch eine Begrünung. Grundsätzlich erfordern Nutzungskonkurrenzen eine Klärung unter Berücksichtigung der jeweiligen Ziele in der Raum- und Stadtentwicklung (vgl. hierzu auch das Handlungsfeld 1).

Die Umwidmung von genutzten Flächen und der Rückbau von Infrastruktursystemen sind planerisch anspruchsvoll und je nach Sektor bzw. Infrastrukturteilsystem mit unterschiedlich hohen Kosten verbunden. Gelegentlich wird ein möglicher Rückbau von Infrastruktur (z. B. Verkehrswege im ländlichen Raum) von den Betroffenen nicht akzeptiert oder aus finanziellen Gründen nicht umgesetzt (z. B. das Entfernen nicht mehr benötigter, stillgelegter Abwasserkanäle). Ressourcen zur Schaffung von Akzeptanz und finanzielle Anreize für Rückbau von Infrastruktur fehlen in vielen Fällen.

**Empfehlungen:**

**E23**: Der durch den Neubau von Infrastrukturen verursachte Flächenverbrauch sollte möglichst reduziert werden.

**E24**: Es sollte eine obligatorische Prüfung der Flächeninanspruchnahme für Infrastruktursysteme in der Bauleitplanung und Fachplanungsgesetzen verankert werden.

**Adressaten der Empfehlungen**

Die Inanspruchnahme von Flächen betrifft insbesondere die Infrastruktursektoren Energie und Verkehr. Die Empfehlungen zur Reduzierung des Flächenverbrauchs richten sich in erster Linie an Politik und Verwaltung in den Kommunen, aber auch der übergeordneten Raumplanung.

**Maßnahmen und Instrumente**

- Förderung multifunktionaler Stadträume:
  Die Umgestaltung und der Rückbau von Verkehrsflächen in multifunktionale Stadträume bzw. Freiräume sollte sowohl planerisch auf kommunaler Ebene als auch finanziell mit Bundes- und Landesmitteln gefördert werden. Das gleiche gilt für den Rückbau von Straßen im ländlichen Raum, wo insbesondere auf der Ebene von Kreisstraßen Rückbaupotenziale bestehen.
- Fiskalische Beeinflussung der Siedlungsentwicklung:
  Neben der Förderung von Umgestaltung und Rückbau wären fiskalische Instrumente zur Beeinflussung der Baulandentwicklung bzw. -ausweisung denkbar, beispielsweise Umlagen oder Abgaben auf die Ausweisung und Erschließung von zusätzlichen Siedlungsflächen sowie eine zonierte Grundsteuer, bei der Brachflächen im Innenbereich höher besteuert werden. Allerdings sind hier höherrangige rechtliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen.
- Schaffung Datengrundlage zu Innenentwicklungspotenzialen:
  Eine wichtige Maßnahme, um Innenentwicklung gegenüber der Neuausweisung verbindlich zu stärken, ist auch hier die Schaffung einer Datengrundlage, die insbesondere Auskunft über Innenentwicklungspotenziale gibt.
- Ausgleich von Flächenausweisungen:
  Eine weitere Maßnahme ist, den Neubau von Infrastrukturen mit Rückbaustrategien zu koppeln, um die zusätzliche Flächeninanspruchnahme zu neutralisieren und mittel- bis langfristig das Ausmaß der durch Siedlung und Verkehr beanspruchten Flächen einzufrieren.

## 2.10 Handlungsfeld: Informations- und Kommunikationstechnologien als Schlüsseltechnologie begreifen

**Ergebnisse der bisherigen Analyse**

Die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sind die Schlüsselinfrastruktur zur Sektorkopplung und für die Entwicklung (neuer) Dienstleistungen. Die auf Basis von IKT ermöglichten (neuen) Dienstleistungen können sich positiv auf Ressourcenleichtigkeit und die effiziente Weiterentwicklung von Infrastrukturen auswirken (z. B. als Voraussetzung für virtuelle Kraftwerke oder intelligente multimodale Verkehrssysteme), sie können jedoch ebenso kritische Entwicklungen für den Ressour-

ceneinsatz beschleunigen (z. B. autonomes Fahren und den damit möglicherweise verbundenen zusätzlichen MIV). In diesem Zusammenhang ist auch das Thema Datenschutz und -sicherheit zu klären, um Sicherheit und Akzeptanz bei den Akteuren (Unternehmen und Bürgern) zu gewährleisten.

Auch wenn beim Einsatz von IKT viele kritische Rohstoffe verwendet werden und der IKT-Infrastrukturausbau zusätzliche Ressourcen in Anspruch nimmt, stehen jedoch positive „ressourcenleichte" Effekte in anderen Sektoren gegenüber. IKT-Ausbau ist damit „Mittel zum Zweck", zumal in der Gesamtschau der betrachteten Sektoren die IKT-Infrastrukturen mengenmäßig kaum ins Gewicht fallen (vgl. Teil C). Diese „enabler"-Funktion weist der IKT eine zentrale Rolle bei der ressourcenleichten Gestaltung/Umgestaltung von Infrastrukturen zu.

### Empfehlungen

**E25**: Der Breitbandausbau sollte weiter vorangetrieben werden. Bei der Vergabe von Investitionskostenzuschüssen, beispielsweise aus Landes- und Bundesförderprogrammen, sollten jene Technologien bevorzugt werden, die ressourcenleicht und zukunftssicher sind.

**E26**: Es sollten Mindestanforderungen an die Energieeffizienz von Rechenzentren definiert werden, vergleichbar mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) bei Gebäuden. Dies könnte beispielsweise auf europäischer Ebene erfolgen (Ökodesign-Richtlinie) oder im Zusammenhang mit nationalen Förderprogrammen.

**E27**: Bei zunehmender Abhängigkeit von Datenübertragung muss ein besonderes Augenmerk auf den Datenschutz und die Datensicherheit gelegt werden. Zur Erreichung der Akzeptanz von neuen vernetzten Technologien muss die Zivilgesellschaft an der Entwicklung von zuverlässigen Datenübertragungsstandards beteiligt werden.

**E28**: Damit der Wettbewerb unter IKT-Anbietern aufrecht erhalten bleibt und keine parallelen IKT-Infrastrukturen aufgebaut werden müssen, ist die Interoperabilität von Datenübertragungsstandards und Software maßgeblich. Hier sind Standardisierungsinstitutionen gefordert, offene Standards zu entwickeln, die von der Industrie ohne proprietäre Einschränkungen angewendet werden können (z. B. für Smart-Home, Smart-Metering, sektorenübergreifende Vernetzung).

**E29**: Die wissenschaftlichen Grundlagen zur Bewertung der Ressourceninanspruchnahme durch IKT müssen verbesset werden. Hierzu sollten entsprechende Forschungsaktivitäten intensiviert werden.

### Adressaten der Empfehlungen

Die Empfehlungen dieses Handlungsfeldes betreffen in besonderer Weise die IKT-Infrastruktur und richten sich in erster Linie an Kommunen und Unternehmen (E25), an Politik und Verwaltung aller Ebenen (E26), an Gesetzgeber, Verbände und Zivilgesellschaft (E27) sowie im Zusammenhang mit Fragen des Wettbewerbs (E28) an Unternehmen und bei der wissenschaftlichen Grundlage an Bund und Länder (E29).

### Maßnahmen und Instrumente

- Förderung Breitbandausbau unter Einbezug von Ökobilanzen:
  Die Breitbandstrategie des Bundes fördert den Breitbandausbau mit mehreren Mrd. Euro (das Fördervolumen der 3. Antragstranche vom 22.10.2015 beträgt 2,7 Mrd. Euro). Die Fördervoraussetzungen sind dabei im Wesentlichen durch technische Parameter festgelegt und beinhalten keine umwelt- oder ressourcenbezogenen Kriterien. Damit die jetzt getätigten Investitionen ressourcenleicht und zukunftssicher sind, sollten die eingesetzten Technologien Ökobilanzen unterzogen werden. Vergleichbar dem im Hochbau etablierten Instrument der Umweltproduktdeklarationen (EPD – environmental product declaration) sollten die unterschiedli-

chen Breitbandtechnologien ihre Umweltauswirkungen mit einheitlichen Berechnungsregeln transparent machen. Die Förderprogramme könnten in einem weiteren Schritt auf die Ergebnisse der Umweltproduktdeklarationen Bezug nehmen und Mindestvoraussetzungen für die Förderung schaffen oder ressourcenschonende Technologien stärker fördern.

- Einführung Energiemonitoring:
  Der Energieverbrauch in Rechenzentren wird in den kommenden Jahren weiter ansteigen und einen erheblichen Anteil am Gesamtstromverbrauch ausmachen (vgl. BMWi 2015[130]). Dennoch fehlen für Rechenzentren bislang verbindliche Regularien, die einen effizienten Betrieb und eine ressourcenschonende Planung begünstigen. Als konkrete Maßnahme sollte für Rechenzentren daher eine Pflicht zum Energiemonitoring und zur Berichterstattung von Energieeffizienzkennzahlen (und ggf. Ressourceneffizienzkennzahlen) eingeführt werden. Ein geeignetes Instrument, solch eine Verpflichtung einzuführen, könnten eine EU-Richtlinie darstellen oder nationale Förderprogramme.
- Schutz von Daten:
  Sektorenübergreifende Effizienzpotenziale lassen sich in der Regel nur durch eine stärkere Vernetzung und erhöhte Datenübertragung erreichen. Damit Zukunftstechnologien wie beispielsweise Smart-Homes, Smart-Metering, virtuelle Kraftwerke, autonomes Fahren und Industrie 4.0 Akzeptanz bei den Bürgerinnen und Bürgern finden, müssen daher der Datenschutz gewährleistet sein und persönliche oder geschäftliche Daten vor Missbrauch geschützt werden. Zur Erreichung dieser Akzeptanz ist ein Bürgerdialog zum Datenschutz zu initiieren, der in verbindlichen Standards und gesetzliche Mindestanforderungen zum Datenschutz mündet.
- Nutzung von Mobilfunkdaten:
  Zu beachten ist die Zweitverwertung von Mobilfunkdaten, die enormes Potenzial aufweist. Mobilfunkbetreiber drängen massiv in den Datenmarkt durch das Anbieten ihrer ubiquitär den Raum abdeckenden Telefonverkehrsdaten (z. B. Das O2-Netz generiert täglich von 43 Mio. Kunden vier Mrd. Events in ca. 300.000 Mobilfunkzellen in Deutschland). Durch Kombination mit anderen Datenbanken (z. B. Hacon oder Waze) können Bewegungsprofile von Menschen und Fahrzeugen erstellt und so auch Verkehrsströme analysiert werden, die als Grundlagen für intelligentes Infrastrukturmanagement dienen können. Hier sind jedoch noch geeignete Datenschutzregelungen zu finden.
- Normung und Standardisierung als Grundlage von Interoperabilität:
  Ein weiteres Standardisierungsthema ist die Interoperabilität von technischen Systemen und Software (vgl. Bundesrat 2016[131]). Durch noch zu schaffende Normen zur Interoperabilität muss sichergestellt werden, dass Technologien zuverlässig und reibungslos zusammenarbeiten und die Vernetzung nicht durch proprietäre Übertragungsstandards behindert wird. Entsprechende Normungsaktivitäten sollten daher in einem transparenten Prozess von allen interessierten Kreisen begleitet werden.

130 Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie; Fraunhofer IZM und Borderstep-Institut, Berlin, November 2015; http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.html.

131 Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Schwerpunkte der IKT-Normung für den digitalen Binnenmarkt; Bundesrat-Drucksache 205/16 vom 20.04.16; https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2016/0201-0300/205-16.pdf?__blob=publicationFile&v=1

# 3 Adressaten der Handlungsempfehlungen und Policy-Mix

Die im Rahmen von RELIS herausgearbeiteten Handlungsempfehlungen richten sich nicht an einzelne autonome Akteure, sondern erfordern in den meisten Fällen eine abgestimmte und kooperative Herangehensweise. Schon die Zuordnung zu verschiedenen Akteursgruppen ist nur eingeschränkt möglich (vgl. Abbildung 124**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Damit die Ergebnisse der Studie und insbesondere die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen aufgegriffen werden können, müssen diese jedoch relevante Adressaten erreichen. Bei den bisherigen Überlegungen und Analysen wurden insbesondere die folgenden Stakeholder identifiziert, die als unterschiedliche Zielgruppen für die Handlungsempfehlungen verstanden werden:

- Politik/Verwaltung
  - Bund (BMUB, BMWi, BMVI, UBA, BNetzA)
  - Länder (Ministerien)
  - Kommunen (Kreisverwaltungen, Stadtentwicklung und Verkehrsplanung, Umwelt- und Naturschutzbehörden)
- Unternehmen:
  - Infrastrukturbetreiber (Energie, Verkehr, Siedlungswasserwirtschaft, Informations- und Kommunikationstechnologien)
  - Anlagenbauer
  - Anbieter von Dienstleistungen zur Nutzung der Infrastrukturen
- Verbände:
  - BDEW, VKU, DVGW, VDV, DWA, …
  - Verbraucherverbände
  - Umweltverbände
- Zivilgesellschaft

Für die Frage, wie die jeweiligen Adressaten am besten mit den Handlungsempfehlungen zu erreichen sind, ist auch der jeweilige Charakter dieser Empfehlungen von Bedeutung. Insgesamt hat sich im Ergebnis von RELIS ein breiter Mix an Empfehlungen ergeben, die unterschiedliche Dimensionen der Ausgestaltung von Infrastrukturpolitik ansprechen (Policy-Mix). Schwerpunkte liegen bei institutionellen und technischen Aspekten, die für einen ressourcenleichten Umbau der betrachteten Infrastruktursysteme zu betrachten sind. Inhaltlich steht insbesondere die Informations- und Kommunikationstechnologie als Schlüsseltechnologie im Fokus (vgl. Abbildung 124).

Abbildung 124: Empfehlungen nach Dimensionen der Ausgestaltung von Infrastrukturpolitik

| Handlungsfelder \ Policy-Mix | | Informatorisch | Institutionell | Technisch | Organisatorisch | Finanziell |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Bewusstsein schaffen, Ziele festlegen | E1 | E2; E4 | | E3 | |
| 2. | Unterschiedliche räumliche Kontexte beachten | E5 | | | E6 | |
| 3. | Gebauter Infrastrukturbestand – Perspektivwechsel zur Nutzung der bestehenden Infrastrukturen einnehmen | E7; E8 | | E7 | | |
| 4. | Ressourcenleichtes Verhalten durch Infrastrukturen ermöglichen | | E10; E11 | E9 | | E10; E11 |
| 5. | Dilemma aus Flexibilität und Sicherheit annehmen: Planung, Umsetzung und Technik | | E13; E14 | | E12; E13 | E14 |
| 6. | Noch stärker als bisher auf integrierte Lösungen setzen | E17 | E16 | E16 | E15; E16 | |
| 7. | Rohstoffe – Kreislaufwirtschaft fördern – Umweltfolgen verringern | | E19 | E18 | | E18; E19 |
| 8. | Energiewende beschleunigen und Kohleausstieg forcieren | | E20 | E21; E22 | | |
| 9. | Bei der Infrastrukturplanung die Flächenpotenziale berücksichtigen | | E23; E24 | E23 | | |
| 10. | Informations- und Kommunikationstechnologien als Schlüsseltechnologie begreifen | E29 | E27 | E25; E26; E28 | | E25; E26; E29 |

Erläuterung: „E“ steht für Empfehlung

Quelle: Difu/Öko-Institut.

Wie die Beispiele zu den Maßnahmen und Instrumenten zeigen, gibt es für die Umsetzung der einzelnen Empfehlungen meist ein ganzes Bündel an Möglichkeiten. Oder es ist sogar die Kombination mehrerer Maßnahmen erforderlich. Aus diesem Grund ist auch die Zuordnung im Policy-Mix häufig nicht eindeutig und sollte nicht als Korsett, sondern als flexible Hülle angesehen werden, die auch andere Verknüpfungen zulässt. Die Auseinandersetzung mit der inneren Systematik der Handlungsempfehlungen hilft auf diese Weise dabei, für konkrete Maßnahmen die richtigen Ansprech- und Kooperationspartner zu finden.

# 4 Quellenverzeichnis

AG2 des Nationalen IT-Gipfels (2011): Jahrbuch 2011/2012; Digitale Infrastrukturen; BMWi und Telekom (Hrsg.)

AGFW – Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (2013): AGFW – Hauptbericht 2012. https://www.agfw.de/index.php?eID=tx_nawsecuredl&u=0&file=fileadmin/agfw/content/linkes_menue/zahlen_und_statistiken/Version_1_HB2012.pdf&t=1479216762&hash=d3a5e29fe6f3ee95c662c3b021f9ef93ed0c66fa. aufgerufen am 14.11.2016.

Agora Energiewende (2014a): Das deutsche Energiewende-Paradox: Ursachen und Herausforderungen. http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Analysen/Trends_im_deutschen_Stromsektor/Analyse_Energiewende_Paradox_web.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Agora Energiewende (2014b): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz, Berlin.

Agora Energiewende (2014c): Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien, Berlin.

Agora Energiewende, Fraunhofer-ISE (2015): Current and future cost of Photovoltaics. Long-term scenarios for market development, system prices abd LCOE of utility.scale PV systems, Berlin.

Antoni, Julia; Birkner, Peter; Franke, Ingo (2015): Hybridnetze als Schlüssel der Energiewende. In: Energie Wasser-Praxis 2/2015, S. 14-20.

Arndt, W.-H.; Lehmbrock, M.; Schneider, St.; Frehn, M.; Tack, A.; Schulz, B.; Günthner, St. (2011): Abschätzung und Bewertung der Verkehrs- und Kostenfolgen von Bebauungs- und Flächennutzungsplänen insbesondere für die kommunale Siedlungsplanung unter besonderer Berücksichtigung des ÖPNV. BMVBS-Online-Publikation, Nr. 03/2011.

Arndt, Wulf-Holger (2013): Kommunale Straßenbrücken: Zustand und Erneuerungsbedarf, Berlin.

ASUE – Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2011): BHKW-Kenndaten 2011. Module, Anbieter, Kosten, Berlin.

ATT/BDEW/DBVW (2011): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011. wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.

ATT/BDEW/DBVW/DVGW/DWA/VKU (Hrsg.) (2015): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2015, Bonn.

Bauknecht, Dierk (2012): Transforming the grid. Electricity system governance and network integration of distributed generation, 1st ed., Baden-Baden.

Bauknecht, Dierk et. al. (2014): Entwicklung des Flexibilitätsbedarfs im Stromsystem und der Beitrag verschiedener Flexibilitätsoptionen. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 64. Jg. (2014) Heft 11, S.52-55.

Bauknecht, Dierk; Funcke, Simon (2013): Dezentralisierung oder Zentralisierung der Stromversorgung: Was ist darunter zu verstehen? In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 63. Jg. (2013) Heft 8.

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung) (2012): Trends der Siedlungsflächenentwicklung. BBSR-Analysen KOMPAKT 09/2012, Bonn.

BBSR (Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung) (2015): Die Raumordnungsprognose 2035 nach dem Zensus. BBSR-Analysen KOMPAKT 05/2015, Bonn.

BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2010): VEWA – Vergleich Europäischer Wasser- und Abwasserpreise, Berlin. http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20101012_PM_Deutsche_Wasser-_und_Abwasserpreise_im_europaeischen_Vergleich_angemessen?open&ccm=900030. aufgerufen am 18.02.2014.

BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2012): Wasserfakten im Überblick – Stand April 2012. http://www.bdew.de/internet.nsf/id/C125783000558C9FC125766C0003CBAF/$file/Wasserfakten%20im%20%20%C3%9Cberblick%20-%20freier%20Bereich%20April%202012_1.pdf. aufgerufen am 14.01.2014.

BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) (2014): Industriestrompreise., Berlin. https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140428-o-energie-info-industriestrompreise--ausnahmeregelungen-bei-energiepreisbestandteilen/$file/BDEW_Energie-Info_Industriestrompreise_final_28.04.2014_ohne_AP.pdf. aufgerufen am 31.10.16.

Bedtke, Norman (2016): Transformationsprozesse und Institutionen – eine theoretische Per-spektive für die Wasserwirtschaft. In: Gawel, Eric (Hrsg.) (2016): Die Governance der Was-serinfrastruktur. Bd. 2: Nachhaltigkeitsinstitutionen zur Steuerung von Wasser-infrastrukturen. Berlin, S. 9–75.

Bergmann, T.; Bleher, D.; Jenseit, W.: Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau – Materialaufwendungen und technische Lösungen. Im Auftrag des VDI Zentrum Ressourceneffizienz (ZRE). November 2015.

BET Aachen – Die Berater der Energie- und Wasserwirtschaft (2013): Abschlussbericht: Perspektiven der Fernwärme im Ruhrgebiet bis 2050. Endfassung. http://www.bet-aachen.de/veroeffentlichungen/news/news-archiv-2013/detail-news.html?jumpurl=uploads%2Fmedia%2FEntwicklung_von_Fernwaermeperspektiven_im_Ruhrgebiet_bis_2050_final_01.pdf&juSecure=1&locationData=860%3Att_news%3A125&juHash=1f72150f732ceb32bdc8ee4900a09ea0484733ce. aufgerufen am 16.11.2015.

Beyer, Jürgen (2006): Pfadabhängigkeit. Über institutionelle Kontinuität, anfällige Stabilität und fundamentalen Wandel, Frankfurt a.M.

BGBl (Bundesgesetzblatt) (2011): Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes Vom 31. Juli 2011. http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/gesetze-zur-aenderung-atg/. aufgerufen am 16.11.2015.

BNetzA – Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2015): Bestätigung des Netzentwick-lungsplans Strom für das Zieljahr 2024 (Bedarfsermittlung 2024), Bonn. http://data.netzausbau.de/2024/NEP/NEP2024_Bestaetigung.pdf. aufgerufen am 16.11.2016.

Borderstep (2010): Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz, Berlin/Dessau-Roßlau. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/3708_93_302_materialbestand_bf.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Borderstep (2014): Rechenzentren in Deutschland: Eine Studie zur Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und der Wettbe-werbssituation, Im Auftrag des BITKOM – Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. http://www.bitkom.org/files/documents/Borderstep_Institut_-_Studie_Rechenzentren_in_Deutschland_05-05-2014%281%29.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Bosseler, B. & S. Beck (2012): Vom Schaden zur Sanierung – Bildreferenzkatalog und effiziente Sanierungstechniken für die Grund-stücksentwässerung, 30. Bochumer Workshop Siedlungswasserwirtschaft, Ruhr-Universität Bochum, 09/2012.

Bosseler, Bert et al. (2014): Kanalabdichtungen – Auswirkungen auf die Reinigungsleistung der Kläranlagen und der Einfluss auf den örtlichen Wasserhaushalt. Gelsenkirchen (Im Auftrag des UBA).

Brand, Fridolin (2005): Ecological Resilience and its Relevance within a Theory of Sustainable Development. UFZ-Report 03/2005, S.40ff.

BSW-Solar – Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2014): Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie). https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2014_11_BSW_Solar_Faktenblatt_Solarwaerme.pdf. aufgerufen am 14.11.2016.

Bundesministerium des Innern (BMI) (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Themen/Sicherheit/SicherheitAllgemein/kritis.html. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2011): Wasserwirtschaft in Deutschland. Wasserversor-gung – Abwasserbeseitigung, Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/wawiflyer_uba_de_web.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2013): Wasserwirtschaft in Deutschland. Wasserversorgung – Abwasserbeseitigung. http://www.markgroeningen.de/Faltblatt_Wasser_Abwasser%280%29.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2014): Aktionsprogramm Klimaschutz 2020. http://www.bmub.bund.de/service/publikationen/downloads/details/artikel/aktionsprogramm-klimaschutz-2020/. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2012): Verkehrsinvestitionsbericht Berichtsjahr 2012. http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/verkehrsinvestitionsbericht-2012-teil-a.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 14.11.2016.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2015): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. Abschlussbericht des BMVI, 2015, Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014a): Digitale Agenda 2014–2017. http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/digitale-agenda-2014-2017,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014b): Ein Strommarkt für die Energiewende. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Grünbuch), Berlin.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014c): Erdgasspeicher: Deutschland hat EU-weit die größten Kapazitäten, https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2014/29/Meldung/infografik-erdgasspeicher-deutschland-hat-eu-weit-die-grorssten-kapazitaeten.html. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2014d): Gesetzeskarte für das Gas- und Stromversorgungssystem, Stand: Dezember 2014. www.bmwi.de/go/gesetzeskarte. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie; Fraunhofer IZM und Borderstep-Institut, Berlin November 20162015. https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht. aufgerufen am 16.11.2016.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2009): Breitbandstrategie der Bundesregierung. http://www.bmwi.de/Dateien/BBA/PDF/breitbandstrategie-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2012): Monitoringbericht 2012. http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2012/MonitoringBericht2012.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 16.11.2015.

Bundesnetzagentur (BNetzA) (2013a): Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung und Offshore-Netzentwicklungsplanung gem. § 12a Abs. 3 EnWG. Az.: 6.00.03.05/13-08-30/Szenariorahmen 2013, Berlin.

Bundesnetzagentur(BNetzA) (2013b): Monitoringbericht 2013. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2013/131217_Monitoringbericht2013.pdf?__blob=publicationFile&v=15. aufgerufen am 16.11.2015.

Bundesnetzagentur(BNetzA) (2014): Auswertung Kraftwerksliste Bundesnetzagentur nach erneuerbaren Energieträgern – ohne endgültig stillgelegte Anlagen. http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicher-heit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/Kraftwerksliste_2014.xls;jsessionid=11C003722D45B974D69E5203D3622FD4?__blob=publicationFile&v=12. aufgerufen am 16.11.2015.

Bundesrat 2016 Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Schwerpunkte der IKT-Normung für den digitalen Binnenmarkt; Bundesrat Drucksache 205/16 vom 20.04.16. https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2016/0201-0300/205-16.pdf?__blob=publicationFile&v=1. aufgerufen am 16.11.2016.

Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. (Nationale Nachhaltigkeitsstrategie. http://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Nachhaltigkeit/2014-12-08-perspektiven-fuer-d.pdf;jsessionid=CCE9D969A37433221DBF6F354BE0FCEB.s2t1?__blob=publicationFile&v=1. aufgerufen am 31.10.2016.

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5. aufgerufen am 14.11.2016.

Cisco (2014): Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2013–2018; Cisco Systems Inc.; San Jose 2014.

Daehre, Karl-Heinz (2012): Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung; Kommissionsbericht.

DAV Deutsche Asphaltverband e.V. (2014): Wiederverwenden von Asphalt. Überarbeitung 2014, Bonn. http://www.asphalt.de/media/exe/134/867e44dfcb2e06a89a88f9911e19d02d/wiederverwenden_2014.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Davoudi, Arash; Martina Winker, Danijela Milosevic, Engelbert Schramm, Ruth Scheidegger (2016): Stoffstromanalyse zu verschiedenen Wasserinfrastruktursystemen in Frankfurter und Hamburger Quartieren. netWORKS-Papers Nr. 30, Berlin.

DENA – Deutsche Energie Agentur (2010a): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025. Berlin. http://www.dena.de/publikationen/energiesysteme/dena-netzstudie-ii.html. aufgerufen am 04.02.2014.

DENA – Deutsche Energie-Agentur GmbH (2010b): Kurzanalyse der Kraftwerksplanung in Deutschland bis 2020 (Aktualisierung). Annahmen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Energiesysteme/Dokumente/KurzanalyseKraftwerksplanungDE_2020.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

DENA – Deutsche Energie-Agentur GmbH (2012): Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. (kurz: dena -Verteilnetzstudie) Endbericht. Berlin. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Projekte/Energiesysteme/Dokumente/denaVNS_Abschlussbericht.pdf. aufgerufen am 30.12.2016.

Deutscher Bundestag (2013): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Hans-Josef Fell, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN – Drucksache 17/14129. http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/17/144/1714416.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Dolata, U. (2009): Technological innovations and sectoral change. Transformative capacity, adaptability, patterns of change: An analytical framework. Research Policy 38.

Dreier, Horst (1998): Grundgesetz, Bd. II. Tübingen.

DUH (2010): Plan N – Handlungsempfehlungen an die Politik: Forum Netzintegration Erneuerbare Energien. Radolfzell.

DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2009): Zustand der Kanalisation in Deutschland. Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009. https://de.dwa.de/tl_files/_media/content/PDFs/Abteilung_AuG/Zustand-der-Kanalisation-in-Deutschland-2009.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Eckey, Hans Friedrich; Stock, Wilfried (2000): Verkehrsökonomie: Eine Empirisch Orientierte Einführung in Die Verkehrswissenschaften. Heidelberg.

Ernst & Young (2013): Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler. https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-analyse-fuer-flaechendeckenden-einsatz-intelligenterzaehler,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Europäische Kommission (2004): Weißbuch zu Dienstleistungen von allgemeinem Interesse – Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Brüssel, den

12.5.2004, KOM(2004) 374 endgültig. http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004_2009/documents/com/com_com%282004%290374_/com_com%282004%290374_de.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Europäische Kommission (2013): Leitfaden zur Anwendung der Vorschriften der Europäischen Union über staatliche Beihilfen, öffentliche Aufträge und den Binnenmarkt auf Dienstleistungen von allgemeinem wirtschaftlichem Interesse und insbesondere auf Sozialdienstleistungen von allgemeinem Interesse. Brüssel, den 29.4.2013, SWD(2013) 53 final/2. http://ec.europa.eu/competition/state_aid/overview/new_guide_eu_rules_procurement_de.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Europäische Kommission (KOM 2011) (2011 ): Weißbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum – Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem, Brüssel. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144. aufgerufen am 31.10.2016.

FNB Gas – Die Fernleitungsnetzbetreiber (2013): Netzentwicklungsplan Gas 2013 der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber, http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmart-Grid/Gas/NEP_2013/NEP_2013_FINAL.pdf;jsessionid=3E0AB6EE428E73ECDFFDB997D95A74F7?__blob=publicationFile&v=2. aufgerufen am 16.11.2015.

FNB Gas – Die Fernleitungsnetzbetreiber (2014): Konsultationsdokument Netzentwicklungsplan Gas 2014. http://www.fnb-gas.de/files/nep_gas_2014_konsultationsdokument_2014-02-17.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

FNB Gas – Die Fernleitungsnetzbetreiber (2015): Maßnahmenliste + Netzausbauvorschlag Netzentwicklungsplan Gas 2015. http://www.fnb-gas.de/files/2015_04_01_anlage_4_nep-gas-2015_massnahmenliste+netzausbauvorschlag.xls. aufgerufen am 16.11.2015.

Forsthoff, Ernst (1938): Die Verwaltung als Leistungsträger, Stuttgart.

Forsthoff, Ernst (1958): Die Daseinsvorsorge und die Kommunen, Stuttgart.

Fraunhofer ISE (2016): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 14.10.2016. https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Friedrich, Bernhard (2015): Verkehrliche Wirkung autonomer Fahrzeuge in „Autonomes Fahren – Technische rechtliche und gesellschaftliche Aspekte“. http://www.springer.com/de/book/9783662458532. aufgerufen am 31.10.2016.

Frischknecht R., Stucki M. (2009): Primärenergiefaktoren von Transportsystemen, im Auftrag des Bundesamtes für Energie BfE, Uster.

Frühschütz, O. (2014): Gasbehälter (Gasometer) und Gaswerke in Deutschland. http://www.gaswerk-augsburg.de/deutschland.htm. aufgerufen am 16.11.2015.

Gartner (2014): Press Release; Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2015. http://www.gartner.com/newsroom/id/2867917. aufgerufen am 16.11.2016.

Gawel, Erik,. Wolfgang Köck, Harry Schindler, Robert Holländer, Sabine Lautenschläger (2015): Mikroverunreinigungen und Abwasserabgabe. UBA-TEXTE 26/2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_26_2015_mikroverunreinigungen_und_abwasserabgabe_1.pdf. aufgerufen am 16.10.2016.

Grazer Energieagentur (2007): Technisches und wirtschaftliches Marktpotenzial der Wärmeenergieerzeugung aus dem Abwasser in Österreich, Graz.

Grömling, Michael; Puls, Thomas (2014): Infrastrukturmängel führen schon heute zu Beeinträchtigungen, in: Internationales Verkehrswesen 1/2014.

Hacker, Florian et. al. (Öko-Institut e.V.) (2014): eMobil 2050 Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz, Öko-Institut, Berlin, September 2014.

Hahne, Ulf (2016): Resilienz als normative Herausforderung lokaler Transformationspolitik; in: Hahne, Ulf; Kegler, Harald (Hrsg.): Resilienz. Stadt und Region – Reallabore der resilienzorientierten Transformation, Frankfurt am Main. S. 61–80.

Hamburg Wasser (2008): HAMBURG WASSER legt „Wasserbedarfsprognose 2030“ vor. Hamburg bekommt bundesweit einmalige Datenbasis für seine Wasserversorgung der Zukunf. http://www.hamburgwasser.de/news/items/hamburg-wasser-legt-wasserbedarfsprognose-2030-vor.html. aufgerufen am 16.11.2015.

Holstenkamp, Lars; Müller, Jakob R. (2013): Zum Stand von Energiegenossenschaften in Deutschland. Ein statistischer Überblick zum 31.12.2012.

Holzhey, M. (2010): Schienennetz 2025/2030 – Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. August 2010.

Holzhey, M.; Naumann, R.; Berschin, F.; Kühl, I.; Petersen, T. (KCW GmbH) (2012): Schienengüterverkehr 2050 – Szenarien für einen nachhaltigen Güter-verkehr, Kurzgutachten für den Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) – Materialien zur Umweltforschung 45.

Hülsmann, F.; Mottschall, M.; Hacker, F.; Kasten, P. (Öko-Institut e.V.) (2014): Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050; Öko-Institut Working Paper 3/2014.

HWWI – Hamburger Weltwirtschaftsinstitut (2013): Wie heizen wir morgen? Fakten, Trends und Perspektiven für Heiztechniken bis 2030. http://www.hwwi.org/uploads/tx_wilpubdb/HWWI-Update_05_2013.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Jansen, D., (2000): Der neue Institutionalismus. Speyer, Antrittsvorlesung an der deutschen Hochschule für Verwaltungswissenschaften Speyer. http://www.uni-speyer.de/files/de/Lehrst%C3%BChle/Jansen/Publikationen/Speyerer_Vortr%C3%A4ge_Institutionalismus_2000.pdf. aufgerufen am 27.04.2016.

Kasten, P.; Mottschall, M. (Öko-Institut e.V.); Köppel, W; Degünther, C. (DVGW Ebi); Schmied, M.; Wüthrich, P. (Infras AG) (2016): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050; Im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Kerber, Heide, Engelbert Schramm, Martina Winker (2016): Transformationsrisiken bearbeiten: Umsetzung differenzierter Wasserinfrastruktursysteme durch Kooperation. Berlin, (netWORKS-Papers Nr. 28). https://networks-group.de/de/publikationen/networks-paper.html. aufgerufen am 16.10.2016.

Kluge Thomas; Libbe, Jens (Hrsg.) (2006): Transformation netzgebundener Infrastruktur – Strategien für Kommunen am Beispiel Wasser, Berlin.

Kluge, Thomas, Scheele, Ulrich (2003): Transformationsprozesse in netzgebundenen Infrastruktursektoren. Neue Problemlagen und Regulationserfordernisse, netWOKRS-Paper 1, Berlin.

Kluge, Thomas; Libbe, Jens (Hrsg.) (2010): Transformationsmanagement für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Handreichung zur Realisierung neuartiger Infrastrukturlösungen im Bereich Wasser und Abwasser. Berlin.

Knappe, F. (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg); Bergmann, T.; Mottschall, M. (Öko-Institut e.V.) (2016): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub. Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung. FKZ 3712 33 324. Umweltbundesamt.

Knieps, Günter (2011): Wettbewerb und Pfadabhängigkeit in Netzen. Diskussionsbeitrag Institut für Verkehrswissenschaft und Regionalpolitik, Nr. 140 – Juli 2011. https://portal.uni-freiburg.de/vw/files/files-publikationen/disk/disk140. aufgerufen am 16.11.2016.

Konrad, K., Truffer, B., Voss, J.P., (2008): Multi-regime dynamics in the analysis of sectoral transformation potentials: evidence from German utility sectors. Journal of Cleaner Production, 16 (11), 1190-1202.

Köser, H.; Herbst, G.; Konitzer, E.; Rozycki, C. v.: Ökobilanzierung von Schienenverkehrssystemen am Beispiel des ICE-Verkehrs. Phase1, Teil 1 (Datenerhebung). Abschlussbericht der Martin Luther-Universität Halle-Wittenberg im Auftrag der Deutschen Bahn AG. Halle: 2002.

Kost, Christoph et al. (2013): Stromentstehungskosten Erneuerbare Energien, Studie, Fraunhofer ISE. http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Lessner, Armin (2015): Viel Potenzial im Wassersektor, in: ZfK 10/2015, S. 27.Lloyd’s Register (2012): LNG-fuelled deep sea shipping – The outlook for LNG bunker and LNG-fuelled newbuild demand up to 2025, August 2012.

Libbe, Jens; Hanke, Stefanie; Verbücheln, Maic (2011): Rekommunalisierung – Eine Bestandsaufnahme. Berlin (Difu-Papers).

Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J. (2010): Infrastruktur und Stadtentwicklung. Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung, Berlin.

Libbe, Jens; Petschow, Ulrich (2016): Analyse der bisherigen Entwicklung von Infrastrukturen. Bericht im Rahmen des Projekts „Notwendigkeiten und Möglichkeiten zur klimaresilienten und zukunftsfähigen Ausgestaltung von nationalen und grenzübergreifenden Infrastrukturen“, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, (unter Mitarbeit von Wulf Holger Arndt und Holger Floeting), Berlin (unveröffentlicht).

Lloyd’s Register (2012): LNG-fuelled deep sea shipping – The outlook for LNG bunker and LNG-fuelled newbuild demand up to 2025. http://www.lr.org/en/_images/229-77161_LR_bunkering_study_Final_for_web_tcm155-243482.pdf. aufgerufen am 16.11.2016.

Löchter (Deutsche Bahn AG, Bahn-Umweltzentrum) (2009): Access-Datenbank zum Schienennetz der DB AG. Persönliche Mitteilung vom 16.12.2009 (unveröffentlicht).

Maibach, M.; Peter, D.; Seiler, B.: Ökoinventar Transporte: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und den Einbezug in Ökobilanzen. 2. Auflage. Zürich: 1999.

Matthes, Felix, et al. (2012): Fokussierte Kapazitätsmärkte. Ein neues Marktdesign für den Übergang zu einem neuen Energiesystem. Studie für die Umweltstiftung WWF Deutschland.

Monstadt, Jochen (2007): Großtechnische Systeme der Infrastrukturversorgung: Übergreifende Merkmale und räumlicher Wandel. In: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) – Leibniz-Forum für Raumwissenschaften (Hrsg.): Wandel der Stromversorgung und räumliche Politik, 2007, S. 7–34.

Mottschall, Moritz; Bergmann Thomas (2013): Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Straßen- Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-emissionen-durch-infrastruktur. aufgerufen am 31.10.2016.

Mottschall, Moritz; Bergmann Thomas (in Bearbeitung): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen und Wegebau.

Mutschmann, Johann; Stimmelmayr, Fritz (2011): Taschenbuch der Wasserversorgung, Heidelberg.

Netzentwicklungsplan Strom (Hrsg.) (2014): Netzentwicklungsplan Strom. Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber. http://www.netzentwicklungsplan.de/_NEP_file_transfer/NEP_2014_2_Entwurf_Teil1.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Nickel, Darla; Mitchell, Raja Louise; Thamsen, Paul Uwe; Matzinger, Andreas (2015): Improving urban drainage in face of climate and demographic change: interim results of the joint research project KURAS (Concepts for urban rainwater management, drainage and sewage systems). Cities of the Future – Transitions to the Urban Water Services of Tomorrow (TRUST), 28.-30.04.2015, Mühlheim an der Ruhr, Deutschland.

Nitsch, Joachim, et al. (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart.

Öko-Institut/Fraunhofer ISI (2014): Klimaschutzszenario 2050 (1. Modellierungsrunde), Berlin.

Parsons, David; Marcet Cabrera, Enrique; Jeffrey, Paul (2012): Carbon Sensitive urban water futures. http://www.trust-i.net/downloads/. aufgerufen am 31.10.2016.

Peter, Stefan (2013): Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen, Dessau-Roßlau. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_14_2013_modellierung_einer_vollstaendig_auf_erneuerbaren_energien.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Peters, Jürgen (2010): Erneuerbare Energien – Flächenbedarfe und Landschaftsentwicklungen. In: Bundesamt für Naturschutz (BfN): Landschaften in Deutschland in 2030 – Der große Wandel, Bonn.

Prognos AG, EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, GWS – Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose, Basel/Köln/Osnabrück.

PWC – PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft/Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (Hrsg.) (2015): Energiewende-Outlook: Kurzstudie Wärme, Frankfurt am Main (Autoren: Breisig, Dr. Volker, Dr. Peter Claudy, Philip Kohlmorgen, Stephan Tillner, Peik Uhr, Mustafa Zein).

Repenning, J.; Emele, L.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Dehoust, G.; Förster, H.; Greiner, B.; Harthan, R.; Hennenberg, K.; Hermann, H.; Jörß, W.; Loreck, C.; Ludig, S.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Braungardt, S.; Eichhammer, W.; Elsland, R.; Fleiter, T.; Hartwig, J.; Kockat, J.; Pfluger, B.; Schade, W.; Schlomann, B.; Sensfuß, F.; Ziesing, H.; Matthes, F. (2015): Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht; Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Dezember 2015; Berlin. http://www.oeko.de/publikationen/download/2451/2015-608-de.pdf/. aufgerufen am 31.10.2016.

Riechel, Robert; Koritkowski, Sven (unter Mitarbeit von Jens Libbe und Matthias Koziol) (2016): Wärmewende im Quartier. Hemmnisse bei der Umsetzung am Beispiel energetischer Quartierskonzepte, Difu-Papers, Berlin.

Rogers, B.C., et al. (2015): Analysis of institutional work on innovation trajectories in water infrastructure systems of Melbourne, Australia. Environmental Innovation and Societal Transitions, 15, 42–64.

Roland Berger 2011: Trend Compendium 2030; Roland Berger Strategy Consultants; München 2011. http://www.rolandberger.de/expertise/trend_compendium_2030.

Scharp, Michael (2009): Seltene Metalle und Zukunftstechnologien – Vortrag. http://www.hss.de/fileadmin/migration/downloads/FachforumPhysik_Scharp.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Scharp, Michael (2011): Materialbestand und Materialflüsse der IuK-Infrastrukturen: Mobilfunk (Meilensteinbericht MaRess 2.3), Wuppertal. http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_5.pdf. aufgerufen am 16.11.2016.

Scharpf, Fritz W. (1997): Interaktionsformen. Akteurzentrierter Institutionalismus in der Politikforschung, Opladen.

Schleich, Joachim; Hillenbrand, Thomas (2007): Determinants of Residential Water Demand in Germany, Fraunhofer/ISO, Working Paper Sustainability and Innovation No. S 3/2007. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/e-x/working-papers-sustainability-and-innovation/working-paper_water-demand_final_02.pdf. aufgerufen am 06.01.2014.

Schmied, Martin; Mottschall, Moritz (2013): Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastruktur und Schienenfahrzeuge in Deutschland, Berlin.

Siemens (2012): ENUBA – Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen; Schlussbericht der Siemens AG, August 2012.

Siemens 2016: ENUBA 2 – Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen; Schlussbericht der Verbundforschungspartner Siemens AG, TU Dresden und DLR.

Sofie Pandis (2014): Industrial ecology for sustainable urban development – the case of Hammarby Sjöstad, KHT, Stockholm.

Spielmann, Michael et. al. (2007): Life Cycle Inventories of Transport Services. Data v2.0. ecoinvent report No. 14. Villingen/Uster.

Statista (2015a): Länge des Stromnetzes in Deutschland nach Spannungsebene im Jahresvergleich 2000 und 2013 (in 1.000 Kilometer). http://de.statista.com/statistik/daten/studie/37962/umfrage/laenge-der-stromnetze-in-deutschland-in-1998-und-2008/. aufgerufen am 16.11.2015.

Statista (2015b): Anzahl der Kunden von Stromanbietern in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2013 (in Millionen). http://de.statista.com/statistik/daten/studie/164153/umfrage/anzahl-der-kunden-von-stromanbietern-seit-1999/. aufgerufen am 16.11.2015.

Statista (2015c): Entwicklung der Gasnetzlänge nach Art der Rohre in Deutschland in den Jahren 1996 bis 2014 (in Kilometern). http://de.statista.com/statistik/daten/studie/162214/umfrage/gasnetzentwicklung-in-deutschland-seit-dem-jahr-1996/. aufgerufen am 16.11.2015.

Statista (2016): Minenproduktion von Lithium nach den wichtigsten Ländern in den Jahren 2011 bis 2015 (in Tonnen). https://de.statista.com/statistik/daten/studie/159929/umfrage/minenproduktion-von-lithium-nach-laendern/. aufgerufen am 27.10.2016.

Statistisches Bundesamt (2004): Umwelt – Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Fachserie 19 Reihe 2.1. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/WasserAbwasserOeffentlich2190210049004.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 16.11.2015.

Statistisches Bundesamt (2010): Umwelt – Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung – Strukturdaten zur Wasserwirtschaft – Fachserie 19 Reihe 2.1.3.

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Wasserwirtschaft2190213109004.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 16.11.2015.

Statistisches Bundesamt (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013a): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Wasserversorgung. Fachserie 19 Reihe 2.1.1, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/AbwasserOeffentlich2190212109004.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 14.01.2014.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013): Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserbeseitigung – Strukturdaten zur Wasserwirtschaft, Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013b): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Abwasserbehandlung und -entsorgung. Fachserie 19 Reihe 2.1.2, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/AbwasserOeffentlich2190212109004.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 14.01.2014.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013c): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Strukturdaten zur Wasserwirtschaft. Fachserie 19 Reihe 2.1.3, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Wasserwirtschaft2190213109004.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 14.01.2014.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013d): Umwelt. Nichtöffentliche Wasserversorgung und nichtöffentliche Abwasserentsorgung. Fachserie 19 Reihe 2.2, Wiesbaden. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/WasserAbwasserNichtoeffentlich2190220109004.pdf?__blob=publicationFile. aufgerufen am 15.01.2014.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2013e): Statistisches Jahrbuch 2013.

Steger, Sören; Fekkak, Miriam; Bringezu, Stefan (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht MaRess 2.3, Wuppertal. http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_4.pdf. aufgerufen am 16.11.2016.

Tauchmann, Harald et. al. (2006): Innovationen für eine nachhaltige Wasserwirtschaft. Einflussfaktoren und Handlungsbedarf, Heidelberg.

Teece, D.J., (2010): Business models, business strategy and innovation. Long Range Planning, 43, 172–194.

Telekom (2006): Geschäftsbericht 2006, Bonn.

Tietz, Hans-Peter (2007): Systeme der Ver- und Entsorgung – Funktionen und räumliche Strukturen, Wiesbaden.

Trendresearch (2013): Anteile einzelner Marktakteure an Erneuerbare Energien-Anlagen in Deutschland. http://www.trendresearch.de/studien/16-0188-2.pdf?41c6806d6a74510c0999bb1089420467. aufgerufen am 17.02.2016.

Umweltbundesamt (UBA) (2007): Potenziale von Nah- und Fernwärmenetzen für den Klimaschutz bis zum Jahr 2020. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3501.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2009): Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (2010a): CO2-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale – Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Umweltbundesamt (UBA) (2010b): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Dessau-Roßlau. http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Umweltbundesamt (UBA) (2014a): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Umweltbundesamt (UBA) (2014b): Einfluss des Abstands zwischen Windenergieanlagen und Wohnbauflächen auf das Potenzial der Windenergie an Land. Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse auf Grundlage der UBA-Studie „Potenzial der Windenergie an Land“.

Dessau-Roßlau. Texte 73/2014.
http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_73_2014_sensitivitaetsanalyse_0.pdf. aufgerufen am 31.10.2016.

Umweltbundesamt (UBA) (2014c): Klimaschutzszenario 2050. 1. Modellierungsrunde. http://www.oeko.de/oekodoc/2065/2014-638-de.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2015): Kanalabdichtungen – Auswirkungen auf die Reinigungsleistung der Kläranlagen und der Einfluss auf den örtlichen Wasserhaushalt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_21_2015_kanalabdichtungen_auswirkungen_auf_die_reinigungsleistung_der_klaeranlagen.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

Umweltbundesamt (UBA) (2015a): Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern. Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge. Position // März 2015.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/organische_mikroverunreinigungen_in_gewassern_vierte_reinigungsstufe_0.pdf. aufgerufen am 16.10.2016.

Uzun et al. 2012: Uzun, A.; Göndör, S.; Bayer, N.; Kollecker, L. and Küpper, A.: Visualizing the Effects of Power Management Algorithms for Mobile Networks under Realistic Conditions, In Proceedings of the Conference on Electronics Goes Green 2012+ (EGG 2012), IEEE, Berlin, Germany, 09/2012.

Verron, Hedwig et al. (2005): Determinanten der Verkehrsentstehung – Umweltbundesamt, UBA-Texte 26/05.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2967.pdf. aufgerufen am 16.11.2015.

VIZ (2011): Verkehr in Zahlen 2011.

VKU – Verband kommunaler Unternehmen (2012a): Energie im Fokus. Potenziale und Herausforderungen der kommunalen Wasser- und Abwasserwirtschaft, Berlin.

VKU – Verband kommunaler Unternehmen (2012b): Das deutsche Stromnetz – Netzebenen und Stromfluss, Berlin.

Wegener, Thomas; Rüffer; Friederike (2014): Wege zum Trinkwassernetz 2030. Zielnetzentwicklung von Trinkwassernetzen.
1. Auflage, IRO-Schriftenreihe, Vulkan Verlag, Essen.

Wietschel, Martin et al. (Hrsg.) (2010): Energietechnologien 2050: Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung (Technologienbericht), Stuttgart.

Winker, Martina; Kunkel, Sabine; Davoudi, Davoudi; Felmeden, Jörg; Kerber, Heidi; Schramm, Engelbert; Trapp, Jan (2014): Heat and water recovery from wastewater in a passive house – scaling up from building to district level. In: (Electronic) Proceedings of IWA World Water Congress, 21.-25. September 2014, Lissabon, Portugal.

WSV – Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (2014): Gliederung Bundeswasserstraßen.
http://www.wsv.de/wasserstrassen-/gliederung_bundeswasserstrassen/index.html. aufgerufen im November 2014.

Zeitung für kommunale Wirtschaft (ZfK), August 2015. https://www.zfk.de/energieeffizienz/kwk-fernwaerme/artikel/system-kommt-durcheinander.html. aufgerufen am 30.03.2016.

Zimmer et al. (2009): RENEWBILITY – „Stoffstromanalyse nachhaltige Mobilität im Kontext erneuerbarer Energien bis 2030; Verbundforschungsprojekt des Öko-Institut e.V. und DLR-Institut für Verkehrsforschung; in Zusammenarbeit mit: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU), Deutsches Biomasse-Forschungszentrum (DBFZ), Professur für Verkehrsströmungslehre der Technische Universität Dresden; Berlin 2009.

# Teil F: Anhang

## 1 Die SWOT-Matrizen der zehn Infrastrukturteilsysteme

Im Folgenden sind die einzelnen Matrizen zur Sammlung und Einordnung der im Rahmen der SWOT-Analyse gesammelten Argumente abgebildet. Dazu sind in der linken Spalte jeweils die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken als Stichworte aufgeführt. In der rechten Spalte ist jeweils begründet, warum das Argument im Kontext des Vorhabens so eingeordnet ist.

### 1.1 Energieversorgung – SWOT-Analyse der Infrastruktursysteme der Strom-, Wärme- und Gasversorgung

#### 1.1.1 SWOT-Analyse der Stromversorgung

**Stärken der Stromversorgung**

► Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 1: Stärken der Stromversorgung

| ► | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren ▲ | ► dynamische Anpassung von Governance-Strukturen (Akteure[1] bzw. „Akteurslandschaften“) und rechtlichen Regelsystemen (Gesetze und Verordnungen) | - dadurch die Anpassungsfähigkeit des Infrastruktursystems an veränderte Rahmenbedingungen erhöht wird.<br>- dadurch Lernprozesse bei der Transformation des Stromsystems besser entstehen und genutzt werden können. |
| | ► Vielzahl lokaler Stromverteilnetzbetreiber (siehe auch Schwächen) | - dadurch viele „Nischen“ vorhanden sind, in denen neue Lösungen entwickelt werden können.<br>- dadurch eine Struktur vorhanden ist, auf der eine dezentrale Entwicklung der Energiewende aufbauen kann. |
| Ökonomische Faktoren ▲ | ► wettbewerbliche Marktstrukturen: Wettbewerb im Stromvertrieb und um Netzkonzessionen (potenzieller Innovationstreiber; Trennung von Netz und Betrieb) | - dadurch eine effiziente Umsetzung der Energiewende unterstützt wird.<br>- dadurch Innovationen befördert werden.<br>- die Energiewende und ihre Akteure in Deutschland dadurch prinzipiell anschluss- und konkurrenzfähig bleiben an Entwicklungen und Dynamiken einer Energiewende im europäischen und globalen Kontext. |
| Technische Faktoren ▲ | politische Zielvorgaben und Ansatzpunkte (institutionelle wie technische) zur weiteren Entwicklung der Stromversorgung liegen vor | - dadurch ein (langfristiger) Rahmen vorgegeben ist, an dem sich die verschiedenen Akteure orientieren können.<br>- dadurch „vom Ende her“ gedacht werden kann. |
| | Transformationsprozess der Stromversorgung ist eingeleitet (steigender Anteil erneuerbarer Energien) | - sich dadurch Konflikte von der Frage, ob ein EE-System aufgebaut werden soll zu der Frage, wie es aufgebaut werden soll, verschoben haben und damit verstärkt Antworten auf die zweite Frage gesucht werden können. |

| ► | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | | - dadurch vielfältige Eigendynamiken in Gang gesetzt worden sind. |
| | aktuell hohe Flexibilität im System vorhanden (Erzeugungskapazitäten, europäisches Verbundnetz) | - dadurch nicht auf den Aufbau von Flexibilität gewartet werden muss, bis der EE-Ausbau weiter voranschreiten kann. |
| | Optionen zur Reduktion der Ressourceninanspruchnahme liegen sowohl angebotsseitig (EE-Erzeugungsanlagen) und nachfrageseitig (Energieeffizienz und -einsparung) vor | - dadurch Handlungsoptionen entstehen, mit denen die Ressourceninanspruchnahme reduziert werden kann. |
| | hohe Innovationsdynamik in der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle und tech. Optionen (u.a. Speichertechnologien, Lastmanagement) | - dadurch die (techn. und unternehmerischen) Grundlagen für die Energiewende geschaffen werden.<br>- dadurch die Energiewende für neue Akteursgruppen attraktiv werden kann. |
| | hohe Versorgungssicherheit | - von einem offensichtlich sehr gut funktionierenden System ausgegangen werden kann. |
| | Strom als universelle Energieform (Kopplungsfähigkeit mit Verkehr, Wärme und Gas) | - erneuerbare Energien zur Stromerzeugung dadurch in verschiedenen Sektoren genutzt werden können. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Akteure können sowohl Unternehmen in der eigentlichen Leistungserstellung sein (Erzeugung, Transport, Beratung, etc.) als auch Akteure in der Regulierung und „Steuerung“ des Sektors (z.B. BNetzA, Strombörse, Verbände).

### Schwächen der Stromversorgung

► Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 2 : Schwächen der Stromversorgung

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Governance-Strukturen für eine Systemtransformation nicht angemessen entwickelt | - es im Rahmen der Energiewende nicht mehr nur darum geht, erneuerbare Energien zu auszubauen, sondern eine Systemtransformation notwendig ist.<br>- diese Systemtransformation neue Governance-Herausforderungen mit sich bringt, u.a. wegen der Langfristigkeit der Umgestaltung und den damit einhergehenden Unsicherheiten. |
| | Vielzahl lokaler Stromverteilnetzbetreiber (siehe auch Stärken) | - es dadurch zu Ineffizienzen kommen kann und die Regulierung der Netzbetreiber erschwert wird.<br>- viele Netzbetreiber zu klein sind, um sich den Herausforderungen der Energiewende etwa bezüglich der regulatorischen Anforderungen und finanziellen Herausforderungen zu stellen. |
| | Förderinstrumente (EEG, KWK-G), Kostenstrukturen (fixe, variable) und Marktdesign (Kapazitätsmarkt, System-dienstleistungen) | - die Finanzierung von Investitionen auf Dauer ggf. nicht sichergestellt werden kann.<br>- unklare „Signale“ an die Akteure zur weiteren Rich- |

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| | nicht kohärent | tung der Transformation gesendet werden. |
| | Wirtschaftlichkeit von Investitionen unsicher wg. z.T. fehlender/unklarer politischer Zielvorgaben | - dadurch die Gefahr besteht, dass die für die Energiewende notwendigen Investitionen ausbleiben und nicht ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. |
| Ökonomische Faktoren | | - |
| | unsichere Ertragspotenziale für Erzeugungskapazitäten (Erneuerbare und Gas) | - dadurch die Gefahr besteht, dass die für die Energiewende notwendigen Investitionen ausbleiben und nicht ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. |
| | hohe Pfadabhängigkeit von Investitionen (lange Lebensdauer, hohe Fixkosten) | - dadurch Investitionsentscheidungen erschwert werden.<br>- eine Entwicklung in suboptimalen Pfaden verlaufen kann z.B. wenn frühere Investitionen erst abgeschrieben sein müssen, bevor neue, effizientere Technologien verbreitet zum Einsatz kommen. |
| Technische Faktoren | Stromsystem angebotsorientiert ausgerichtet (insb. konventionelle Erzeugungskapazitäten, Effizienz und Nachfragesteuerung findet kaum statt) | - dadurch erhebliche Potenziale für die Umsetzung der Energiewende nicht genutzt werden. |
| | Infrastruktur entspricht nicht den durch die Energiewende zu erwartenden Anforderungen | - dadurch Engpässe bei der Umsetzung der Energiewende entstehen können.<br>- dadurch Ressourcenbedarf besteht für die Umsetzung der Energiewende. |
| | hohe Unsicherheit über zukünftige Systemstrukturen | - dadurch Entscheidungen erschwert werden.<br>- dadurch möglicherweise suboptimale Pfade eingeschlagen werden, z.B. wenn bestehende, abgeschriebene Anlagen mit (veralteter) Technik weiter betrieben werden, da den Akteuren unklar ist, welche Technologien sich künftig etablieren werden. |
| | hohe Anfälligkeit gegenüber Störungen (z.B. die Netzfrequenz), hoher Aufwand zur Sicherstellung von Resilienz | - dadurch Systemveränderungen wie der Aufbau der EE mit einem hohen Risiko einhergehen.<br>- nicht nur institutionell, sondern insb. auch technisch-infrastrukturell Vorsorge getroffen werden muss, was mit entsprechendem Ressourceneinsatz verbunden ist. |
| | Irreversibilität nuklear-fossil basierter Stromversorgung | - die Schäden nuklearer Unfälle nicht rückgängig zu machen sind.<br>- der Rückbau der Kernkraftanlagen enorme Ressourcen in Anspruch nimmt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Chancen im Zusammenhang mit der Stromversorgung**

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 3: Chancen im Zusammenhang mit der Stromversorgung

| Chancen | Begründung, Erläuterungen „Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| Zwingende Begrenzung der $CO_2$-Emissionen | - dadurch erneuerbare Energieträger noch attraktiver/wichtiger werden. |
| europäische Integration | - durch eine europäische Vernetzung die Effizienz der Energiewende in Deutschland und der EU steigen kann.<br>- durch den Austausch Flexibilität im Stromsystem bereitgestellt werden kann.<br>- sie einen Rahmen bietet, in dem auch andere EU-Länder EE ausbauen können. |
| hohe Innovationsdynamik bei EE-Anlagen und Speichertechnologien (unterstützt durch IKT Hard- und Software) | - sich dadurch eine wichtige Grundlage für die Umsetzung der Energiewende entwickelt.<br>- weil die Energiewende dadurch von zusätzlichen Interessensgruppen vorangetrieben wird. |
| Potenziale in anderen Sektoren zur Aufnahme von EE-Überschüssen | - dadurch zusätzliche Flexibilität für den Stromsektor bereitgestellt werden kann.<br>- dadurch andere Sektoren verstärkt mit EE betrieben werden können. |
| Stromsektor im Fokus der Debatten zur Energiewende; vielfältige Akteure (Wirtschaft, Politik, Wissenschaft, Zivilgesellschaft) bringen ihr Wissen und Interessen ein | - ein neues Versorgungssystem nur in einem gesamtgesellschaftlichen Prozess entstehen kann.<br>- das verteilte Wissen und die unterschiedlichen Prioritäten eingebunden werden müssen. |
| zunehmend vielfältige Erzeugerstruktur und Energieträgermix (erneuerbare) | - dadurch der Wettbewerb gestärkt wird.<br>- dadurch die Akzeptanz der Energiewende steigt (Bürger-Energie-Modelle und positive Umwelt- und Klimaschutzeffekte). |
| Energiewende (EE-Ausbau, Ausstieg aus der Kernenergie) öffnet Raum für neue Akteure und Beteiligungsstrukturen | - weil sich dadurch Räume für die Entwicklung neuer technischer, institutioneller und unternehmerischer Lösungen eröffnen.<br>- dadurch die Akzeptanz der Energiewende steigt. |
| gesellschaftliche Akzeptanz für erneuerbare Energien und Energiespartechnologien | - die Energiewende damit politischen Rückhalt findet. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken in Zusammenhang mit der Stromversorgung**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 4: Risiken im Zusammenhang mit der Stromversorgung

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| zunehmender Flexibilitätsbedarf durch fluktuierende erneuerbare Energien (Windenergie und Photovoltaik) und mit Blick auf das Gesamtsystem Flexibilität konventioneller Kraftwerke durch deren Stilllegung insgesamt zurückgehen | - Flexibilitätsbedarf ggf. zukünftig nicht zu akzeptablen Kosten gedeckt werden kann.<br>- dies ggf. Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit hat (auch wenn diese gesetzlich gesichert ist).<br>- die Entwicklung der EE bzw. deren weiterer Ausbau dadurch Restriktionen erfahren kann. |
| Netzumbaubedarf durch erneuerbare Energien | - hier ein relevantes gesellschaftliches Konfliktpotenzial entsteht, dass die Energiewende bremsen kann.<br>- hiermit Ressourceninanspruchnahmen verbunden sein werden. |
| Verknappung von Rohstoffen, die für ein EE-System benötigt werden | - dadurch Optionen für die Energiewende eingeschränkt werden.<br>- ggf. aufgrund steigender Rohstoffpreise für EE-Anlagen die Kosten für deren Produktion steigen kann. |
| hohe Unsicherheit bezüglich der zukünftig zur Verfügung stehenden Technologien | - dadurch Entscheidungen erschwert werden.<br>- dadurch möglicherweise suboptimale Pfade eingeschlagen werden, z.B. wenn bestehende, abgeschriebene Anlagen mit (veralteter) Technik weiter betrieben werden, da den Akteuren unklar ist, welche Technologien sich künftig etablieren werden. |
| hohe Unsicherheit bezüglich einer dezentral oder zentral ausgerichteten Struktur | - dadurch innerhalb der Energiewende ein prominentes Konfliktfeld entsteht. |
| mangelnde Akzeptanz und gesellschaftliche Konflikte bei EE-Ausbau und notwendigen Infrastrukturmaßnahmen (Speicher, Netze) | - dadurch der Aufbau der Infrastruktur für die Energiewende verzögert oder verhindert wird.<br>- dadurch die Akzeptanz für die Energiewende insgesamt sinken kann. |
| Kapazitätsdefizit durch Ausstieg aus der Kernenergie | - dadurch ein Kapazitätsengpass entstehen und die Versorgungssicherheit gefährdet werden kann. |
| Nachfrageprofil anderer Sektoren passt nicht zum Stromangebot | - dann in Folge einer verstärkten Sektorkopplung nicht mehr Flexibilität zur Verfügung gestellt wird, sondern ggf. der Flexibilitätsbedarf weiter steigt.<br>- zusätzliche konventionelle Stromerzeugung genutzt wird, um neue Verbraucher zu versorgen. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.1.2 SWOT-Analyse der Gasversorgung

**Stärken der Gasversorgung**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 5: Stärken der Gasversorgung

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Wettbewerb im Gasvertrieb und um Netzkonzessionen; Trennung von Netz und Betrieb (legal unbundling) | - damit im Prinzip Anreize zur Effizienzsteigerung und Innovation gegeben sind. |
| | Vielzahl lokaler Gasverteilnetzbetreiber | - vor Ort autonom Entscheidungen zur Umgestaltung der Verteilnetze getroffen werden können. |
| Ökonomische Faktoren | Ertragspotenzial | - die Gasversorgung gewinnbringend betrieben werden kann.<br>- finanzielle Spielräume für Investitionen in die Umgestaltung des Versorgungssystems bestehen. |
| Technische Faktoren | internationale Vernetzung der Infrastrukturen | - Puffer und Redundanzen für Gaslieferungen bestehen.<br>- Lieferengpässe vermieden werden können. |
| | unterschiedliche (nationale, internationale, fossile, insb. auch regenerative) Gasquellen (Flexibilität) | - Flexibilität in der Nutzung verschiedener Gasquellen und damit<br>- Vermeiden von Lieferengpässe. |
| | Gasnetze können in bestimmten Grenzen Gase verschiedener Herkunft transportieren (Erdgas, Methan, Wasserstoff; konditionieren) (Flexibilität) | - das Netz auch mit unterschiedlichen Gasquellen (und -typen) genutzt werden kann und keine speziellen (parallelen) Netze aufgebaut werden müssen.<br>- Voraussetzung zur Nutzung von Gasen verschiedener Herkunft und (in Maßen) Konditionen. |
| | Gas polyvalenter Primärenergieträger (Umwandlung in Strom, Wärme, Mobilität) (Kopplungen) | - Gas multifunktional einsetzbar ist und damit verschiedene Nutzungsoptionen für Infrastrukturen bestehen.<br>- die Infrastrukturen auch bei sich ändernden Verbräuchen und Anwendungen weiter genutzt werden können. |
| | Gas als Speichermedium für regenerative Energien (Power-to-gas) (Kopplungen) | - auf bestehende Infrastruktur als Speicher zurückgegriffen werden kann.<br>- ein Langfristspeicher existiert. |
| | hohe Zuverlässigkeit der Versorgungsinfrastrukturen (geringe Versorgungsunterbrechungen) | - die hohe Qualität der Infrastruktur in der Zuverlässigkeit zum Ausdruck kommt. |
| | hohe Lebensdauer der Anlagen und Netze | - die Ressourceninanspruchnahme über viele Jahre diskontiert werden kann. (rechnerische RL) |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Schwächen der Gasversorgung**

- Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 6: Schwächen der Gasversorgung

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Vielzahl lokaler Gasverteilnetzbetreiber (siehe auch Stärken) | - eher kleine Organisationsstrukturen mit geringen Kompetenzen und Wissen (u.a. fachlich und methodisch für innovative, strategische Planungen und damit für eine ressourcenleichte Umgestaltung) einhergehen können.<br>- Synergie- und Skaleneffekte nicht gehoben werden. |
| Ökonomische Faktoren | hoher Fixkostenanteil vs. Verbrauchsschwankungen | - die Finanzierungsgrundlage insbesondere in Regionen mit rückläufigen Gasverbrauchen gefährdet ist. |
| | Rückbau sehr kostenintensiv | - Pfadabhängigkeiten bestehen.<br>- eine bauliche Anpassung (in Richtung Ressourcenleichtigkeit) nicht ohne weiteres finanzierbar und damit möglich ist. |
| Technische Faktoren | im Gasnetz geringe Potenziale zur Ressourcenoptimierung | - Einsparungen bzw. Effizienzsteigerungen nur in geringem Maße umsetzbar sind. |
| | Umweltschäden in Gewinnung (Erdgas und Fracking) und bei Unfällen | - natürliche Ressourcen in Anspruch genommen und geschädigt werden.<br>- ökologische und ökonomische Folgekosten vorliegen. |
| | hohes Gefahrenpotenzial; explosiv (hohe Anforderungen an Netze und Anlagen) | - Aufwendungen zur Vorkehrung getroffen werden müssen.<br>- die Infrastrukturen technisch entsprechend aufwendig und damit ressourcenintensiv sind. |
| | relativ geringe Wirkungsgrade/ hohe Kosten bei der Umwandlung von Strom zu Gas | - hoher Ressourcenaufwand betrieben werden muss, um die potenzielle Speicherfunktion der Gasinfrastruktur im Rahmen der Energiewende nutzen zu können. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Chancen im Zusammenhang mit der Gasversorgung**

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 7: Chancen im Zusammenhang mit der Gasversorgung

| Chancen | Begründung, Erläuterungen „Bietet eine Chance, weil...“ |
|---|---|
| (aus EE erzeugte) Gase als ein wichtiger Baustein der "Energiewende", als potenzieller Speicher (Power-to-Gas) und für die Nutzung für die Stromerzeugung (Gasturbine, KWK) und in anderen Sektoren | - der Umgang mit den volatil erzeugten Erneuerbaren Energien eine zentrale Herausforderung im Rahmen der Energiewende ist.<br>- die bestehenden Gasinfrastrukturen (auch bei sinkenden Raumwärme- und Gasbedarfen) einer weiteren Nutzung zugeführt werden.<br>- die Auslastung der bestehenden Infrastrukturen gesteigert werden kann.<br>- mit vermutlich vergleichsweise geringem Ressourcenaufwand Speicherkapazitäten aufgebaut werden können. |
| Augenmerk auf Ressourceneffizienz und Stoffströme | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems angeregt werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden. |
| verbreitete Diskurse Nachhaltiger Entwicklung | - Bürger und Politik Fragen des Umwelt- und Ressourcenschutzes thematisieren.<br>- effiziente Gaskraftwerke im Vergleich der fossilen Energieträger insbesondere zu Kohlekraftwerken weniger klimaschädlich sind. |
| hohe Dynamik technologischer Entwicklung (im Kontext der Energie-wende Power-to-Gas) | - die aktuell noch geringen Wirkungsgrade in den Power-to-Gas-Technologien erhöht und die hohen Kosten in den kommenden Jahren gesenkt werden können.<br>- die Potenziale für ressourcenleichte Infrastrukturkopplungen der Gasversorgung erschlossen werden können. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken in Zusammenhang mit der Gasversorgung**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 8: Risiken im Zusammenhang mit der Gasversorgung

| Risiken | Begründung, Erläuterungen „Stellt ein Risiko dar, weil..." |
|---|---|
| siedlungsstrukturelle Trends führen zu weiterer "Entdichtung" der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich) | - der Betrieb bestehender Netze pro Kopf kostspieliger wird und damit finanzielle Spielräume für Anpassung/Weiterentwicklung fehlen.<br>- Infrastruktur nicht einfach zurückgebaut werden kann und die Ressourcen (Material, Energie, Fläche) gebunden sind. |
| sinkende Raumwärmebedarfe (Passivhäuser, energetische Sanierung im Bestand und Klimawandel) | - die Netze und Anlagen nicht adäquat ausgelastet sind.<br>- ggf. bauliche Anpassungen (Ressourcenaufwendungen) der Gasinfrastrukturen vor Erreichen der technischen Lebensdauer notwendig werden. |
| Gaspreise gegenüber Braunkohle auf absehbare Zeit nicht konkurrenzfähig (bei bestehenden Preisen für $CO_2$-Zertifikate) | - Investitionen in die Gasversorgung werden zurückgestellt bzw. nicht getätigt.[1]<br>- Innovationen (auch wenn sie bereits entwickelt sind) werden nicht implementiert. |
| internationale Lieferbeziehungen erweisen sich als unzuverlässig oder fallen weg | - die Versorgungssicherheit gefährdet sein kann. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Vgl. hierzu auch das angekündigte Abschaltung des Gaskraftwerks Irrsching (http://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen/irsching-betreiber-wollen-gaskraftwerk-stillegen-a-1026267.html)

### 1.1.3 SWOT-Analyse der Wärmeversorgung

Im Fokus der SWOT steht primär die leitungsgebundene Wärmeversorgung in Form von Fern- und Nahwärmenetzen. Die dezentrale Wärmeerzeugung auf Haus- bzw. Wohnungsebene in Form von Brennkesseln etc. wurde in der SWOT-Analyse „Wärmeversorgung" als Systemalternative zu den netzgebundenen Systemen eingetragen.

**Stärken der Wärmeversorgung**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 9: Stärken der Wärmeversorgung

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | institutionelle Spielräume der Kommunen bei Planung und Betrieb (u.a. Satzungen, B-Pläne) | - über notwendige Anpassung/Weiterentwicklung vor Ort entschieden werden kann.<br>- demokratisch legitimierte Kontrolle über und für die Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung gegeben ist.<br>- dies Investitions- und „Richtungssicherheit“ bietet, die sich institutionell absichern lässt. |
| | geringe Koordinationserfordernisse und Transaktionskosten vor Ort (da ein oder sehr wenige Netzbetreiber) | - in Verbindung mit den kommunalen institutionellen Spielräumen (s.o.) langfristige Entscheidungen getroffen werden können.<br>- (Anm.: Gleichwohl treten zunehmend neue Akteure auf (z.B. Wohnungsunternehmen mit Geschäftsfeld „Wärme“), die dieses Setting nachhaltig verändern. |
| | kein Wettbewerb um Endkunden (aber Wettbewerb mit Systemalternativen wie Gas-, Öl- und Holzheizungen) | - vergleichsweise hohe Investitionssicherheit gegeben ist.<br>- Kundenbindung kann vertraglich langfristig fixiert werden.<br>- langfristige Auslastung der Netze sichergestellt werden kann. |
| | Möglichkeit Anschluss und Benutzungs-zwang zu erlassen | - Entscheidung und Planung zum Ausbau von Wärmeversorgungsinfrastrukturen formal abgesichert werden können.<br>- dies Investitions- und „Richtungssicherheit“ bietet, die sich institutionell absichern lässt.<br>- langfristige Auslastung der Netze sichergestellt werden kann. |
| Ökonomische Faktoren | relativ stabile Ertragsstruktur der Versorger (da kein Wettbewerb um Endkunden und z.T. Anschluss und Benutzungszwang) (Planungssicherheit) | - dies Investitions- und „Richtungssicherheit“ bietet, die sich institutionell absichern lässt.<br>- langfristige Auslastung der Netze sichergestellt werden kann. |
| Technische Faktoren | lokal begrenzte, autonome Wärmenetze | - über notwendige Anpassung/Weiterent-wicklung vor Ort entschieden werden kann.<br>- keine überregionalen Infrastrukturen gebaut werden müssen. |
| | Netze technisch weitgehend ausgereift (robuste Technik bei niedrigen Wärmeverlusten) | - der Wartungs- und Reparaturaufwand (im Vergleich zu innovativen Techniken) gering ist. |
| | Wärmenetze vor Ort gestalt- und skalierbar (zentrale Fernwärme, semi- und dezentrale Nahwärmenetze) (Skaleneffekte beachten) | - unter Ressourcen- und weiteren Effizienzgesichtspunkten die jeweils optimale Konfiguration gewählt werden kann. |
| | vielfältige (fossile, regenerative /innovative) Wärmequellen nutzbar | - bestehende Anlagen auch bei sich verändernden Wärmequellen weiterhin genutzt werden können. |
| | Wärmenetze theoretisch auch für Kälteanwendungen nutzbar (Kopplungen, Flexibili- | - sich deren Auslastung im Jahresverlauf verbessern lässt. |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | tät) | |
| | Fernwärme in KWK und BHKW erzeugt ist vergleichsweise energieeffizient und klimafreundlich bei EE | - (spricht für sich) |
| | hohe Zuverlässigkeit der Versorgungsinfrastrukturen (geringe Versorgungsunterbrechungen) | - der Wartungs- und Reparaturaufwand (im Vergleich zu innovativen Techniken) gering ist. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Schwächen der Wärmeversorgung**

- Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 10: Schwächen der Wärmeversorgung

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | unklare Preisgestaltung, keine Transparenzpflicht bei Kalkulationsgrundlagen (ggf. Akzeptanzprobleme bei Kunden, aufwendige Preisprüfung durch Kartellamt) | - ggf. Akzeptanzprobleme bei Kunden auftreten können und die insgesamt effiziente Form der Wärmeversorgung über Fern- und Nahwärmenetze diskreditiert wird. |
| Ökonomische Faktoren | hoher Fixkostenanteil | - die Finanzierungsgrundlage insbesondere in Stadtquartieren mit sinkenden Bevölkerungszahlen und zurückgehenden Wärmebedarfen gefährdet ist. |
| | Rückbau sehr kostenintensiv | - Pfadabhängigkeiten bestehen.<br>- eine bauliche Anpassung (in Richtung Ressourcenleichtigkeit) nicht ohne weiteres finanzierbar und damit möglich ist. |
| Technische Faktoren | im Wärmenetz selbst eher geringe technische Innovationsdynamik und Potenziale zur Ressourcenoptimierung | - keine neuen (technischen) Optionen für RL in der Wärmeversorgung entwickelt werden.<br>- keine institutionellen Innovationen (z.B: effiziente Koordination von Akteuren und optimierte Steuerung) angeregt werden. |
| | Mindestdichten in Siedlungsstrukturen (EW/m Netzlänge) notwendig, da sonst nicht rentabel/effizient | - hoher Abstimmungsbedarf mit weiteren lokalen und kommunalen Akteuren (Stadtplanung, Wohnungswirtschaft) notwendig ist. Dies impliziert hohe Transaktionskosten und kann im Extrem zu Blockaden führen. |
| | bedingte Elastizität im System, um auf Verbrauchsschwankungen zu reagieren | - auch bei geringem Wärmebedarf (etwa im Sommer) muss eine Mindesttemperatur etc. vorgehalten werden. |
| | begrenzte Netzlänge wegen Wärmeverlusten | - Skaleneffekte nicht erschlossen werden können.<br>- ressourcen- und ökonomische Effizienz ggf. nicht über Größe optimiert werden können. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Chancen im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung**

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 11: Chancen im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| Augenmerk auf Ressourceneffizienz und Stoffströme | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems angeregt werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden. |
| verbreitete Diskurse Nachhaltiger Entwicklung | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems provoziert werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden.<br>- Bürger und Politik Fragen des Umwelt- und Ressourcenschutzes thematisieren. |
| hohe Dynamik technologischer Entwicklung (u.a. im Kontext der Energiewende) | - die Potenziale für ressourcenleichte Infrastrukturkopplungen der Wärmeversorgung erschlossen werden können. Bsp. Wärmenetze als Speicher/Power-to-heat.<br>- sich ggf. neue technische Optionen ergeben, mit denen (diffuse) Wärmequellen für die Wärmenetze erschlossen werden können. Bsp. Kopplung mit dezentraler Solarthermie und Abwasserwärme. |
| Wärmepotenziale in anderen Sektoren (Industrie, Abwasser) geraten in den Fokus | - die Ressourceneffizienz durch das Schöpfen der Wärmepotenziale gesteigert werden kann. |
| Wärmenetze als Energiespeicher (Power-to-heat) (Kopplungen) | - der Umgang mit den volatil erzeugten Erneuerbaren Energien eine zentrale Herausforderung im Rahmen der Energiewende ist.<br>- die bestehenden Wärmeversorgungsinfrastrukturen (auch bei sinkenden Raumwärmebedarfen) einer weiteren Nutzung zugeführt werden.<br>- die Auslastung der bestehenden Infrastrukturen gesteigert werden kann.<br>- mit vermutlich vergleichsweise geringem Ressourcenaufwand Speicherkapazitäten aufgebaut werden können. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 12: Risiken im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…." |
|---|---|
| siedlungsstrukturelle Trends und demografischer Wandel führen zu weiterer "Entdichtung" der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich) | - der Betrieb bestehender Netze pro Kopf kostspieliger wird und damit finanzielle Spielräume für Anpassung/Weiterentwicklung fehlen.<br>- Infrastruktur nicht einfach zurückgebaut werden kann und die Ressourcen (Material, Energie, Fläche) gebunden sind. |
| sinkende Raumwärme-bedarfe (Passivhäuser, energetische Sanierung im Bestand und Klimawandel) | - die Netze und Anlagen nicht adäquat ausgelastet sind.<br>- ggf. bauliche Anpassungen (Ressourcenaufwendungen) der Gasinfrastrukturen vor Erreichen der technischen Lebensdauer notwendig werden. |
| kommunale Haushaltskrise (Kreditwürdigkeit, Gewinnabführungen) | - der finanzielle Handlungsspielraum vor Ort für strategische Planungen und Investitionen in ressourcenleichte Umgestaltungen fehlt.<br>- finanzieller Spielraum in der netzgebundenen Wärmeversorgung nicht beliebig über eine Erhöhung der Gebühren und Tarife gewonnen werden kann.<br>- die kommunalen Energieversorgungsunternehmen in vielen Städten noch immer die wichtigsten Wärmenetzbetreiber sind. |

Quelle. Difu/Öko-Institut.

### Chancen im Zusammenhang mit der Wasserversorgung

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 13: Chancen im Zusammenhang mit der Wasserversorgung

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| Energiefrage (Nutzung der Energiepotenziale) gerät in den Fokus der Wasserversorgung (Beitrag zur Energiewende) | - die hohe technische und Innovationsdynamik der Energiewende auf die Wasserversorgung abstrahlt.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden.<br>- Energiewende auch lokal verhandelt wird.<br>- die Wasserversorgung auf eine sichere Energieversorgung angewiesen ist. |
| Augenmerk auf Ressourceneffizienz und Stoffströme | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems provoziert werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden.<br>- Benchmarkungsprozesse Innovationspotentiale heben. |
| Wasserver- und Abwasserentsorgung organisatorisch zu koppeln/integrieren | - damit das Denken in (lokalen, kleinräumlichen) Wasserkreisläufen organisatorisch erleichtert wird.<br>- sich Planungen besser aufeinander abstimmen lassen. |
| verbreitete Diskurse Nachhaltiger Entwicklung | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems provoziert werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden.<br>- Bürger und Politiker Versorgung mit hochwertigem Trinkwasser voraussetzen und zu dessen Erhalt Fragen des Umwelt- und Ressourcenschutzes thematisieren. |
| demografischer Wandel (Schrumpfung) bedingt sinkende Wasserabgabe | - Innovationsimpulse für die technische Anpassung (Verkleinerung?) gesetzt werden.<br>- geringer Energieaufwand im Betrieb bei geringerem Wasserabsatz.<br>- regionale Wasserhaushalte entlastet werden. |
| sinkende Wasserentnahmen in der Industrie | - regionale Wasserhaushalte entlastet werden. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 1.2 Siedlungswasserwirtschaft – SWOT-Analyse der Infrastruktursysteme der Wasserver- und Abwasserentsorgung

### 1.2.1 SWOT-Analyse der Wasserversorgung

**Stärken der Wasserversorgung**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 14: Stärken der Wasserversorgung

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | etabliertes Benchmarking-System | - damit Anreizstrukturen zur Effizienzsteigerung und Innovation in die Unternehmen hineingetragen werden. |
| | kommunale Selbstverwaltungsaufgabe[1] | - Aufgabe und Aufgabenträgerschaft rechtlich abgesichert sind.<br>- über notwendige Entscheidungen zur Anpassung/ Weiterentwicklung vor Ort entschieden werden kann.<br>- bürgerschaftliche und demokratisch legitimierte Kontrolle über und für Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung gegeben ist. Dies bietet Richtungssicherheit.<br>- die Wasserversorgung damit keinem wettbewerblichen, von außen getriebenen Regime unterliegt. |
| | lokale Steuerung und Entscheidung zur Gestaltung des Systems (lokal angepasst) | - damit ortsangepasste Lösungen ermöglicht werden, die die lokale Ressourcensituation und Kontextbedingungen berücksichtigen können.<br>- bürgerschaftliche und demokratisch legitimierte Kontrolle über und für Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung gegeben ist. Dies bietet Richtungssicherheit. |
| | funktionierende staatliche Aufsicht | - damit Versorgungs- und Dienstleistungsqualitäten (Trinkwasserqualität!) gesichert werden.<br>- damit Tarife und Gebühren kontrolliert werden. |
| | hohe Akzeptanz in Bevölkerung | - hierin funktionierende Organisation und Know-how in Unternehmen zum Ausdruck kommt.<br>- die (kommunalen) Wasserunternehmen Vertrauen genießen und als Träger des Gemeinwohls verstanden werden.<br>- hohe Anforderungen an Trinkwasserqualität und Versorgungssicherheit gegeben sind. |
| | hohe Anforderungen an Trinkwasserqualität | - diese Anforderungen weitestgehend erfüllt werden.<br>- dazu funktionierende Organisation und Know-how in Unternehmen unabdingbar sind.<br>- diese Anforderungen einer staatlichen Kontrolle unterliegen[2]. |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Ökonomische Faktoren | Vollkostendeckungsprinzip | - die Finanzierungsgrundlage auch in Zeiten der Anpassung vorgeschrieben ist.<br>- Infrastrukturen nicht dauerhaft auf Verschleiß gefahren werden können.<br>- Anforderungen europäischen Rechts (Art. 9 WRRL) erfüllt werden. |
| | lange Abschreibungszeiträume | - sich die finanziellen Belastungen von Investitionen im Haushalt strecken lassen.<br>- (können jedoch auch als Schwäche interpretiert werden, da durch die langen Fristen, Strukturen über lange Zeiträume festgeschrieben sind – sofern nicht Sonderabschreibungen vorgenommen werden.)<br>- ähnlich den Finanzen auch die Ressourceninanspruchnahme über viele Jahre diskontiert werden kann. (rechnerische RL) |
| Technische Faktoren | hohe Anschlussgrade[3] | - ein umfangreicher Infrastrukturbestand vorliegt, der keiner nennenswerten Erweiterung (und damit zusätzlichen Ressourceninanspruchnahme) bedarf. |
| | lokal und regional autonome Infrastruktursysteme[4] | - über notwendige Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung vor Ort entschieden werden kann.<br>- keine überregionalen Transportinfrastrukturen gebaut werden müssen.<br>- Energieaufwendungen für den überregionalen Transport entfallen.<br>- ein Anreiz besteht, lokale Wasserressourcen zu schützen (Örtlichkeitsprinzip des § 50 Abs. 2 WHG). |
| | vergleichsweise geringer KRA, KEA und Fläche für Erneuerungsmaßnahmen | - damit an sich schon ressourcenleicht. |
| | geringe Flächeninanspruchnahme für Infrastrukturen und Vorsorgecharakter für TW-Schutzflächen | - der Parameter Fläche in der Bewertung RL-Infrastrukturen der Wasserversorgung nur eine untergeordnete Rolle spielt.<br>- damit die Flächeninanspruchnahme mit ökologisch verträglichen Nutzungen verknüpft ist. |
| | hohe Qualität der Versorgungsinfrastrukturen (geringe Verlustrate und Einhalten der TW-Qualitäten) | - die Versorgung mit geringen Wasserverlusten verbunden und Eingriffe in die hydrologischen Systeme auf ein – in den bestehenden zentralen Strukturen - notwendiges Maß minimiert werden.<br>- in vorsorgenden Gewässerschutz investiert wird. |
| | hohe Lebensdauer der Anlagen und Netze | - ähnlich den Finanzen auch die Ressourceninanspruchnahme über viele Jahre diskontiert werden kann. (rechnerische RL) |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | Kopplungen mit anderen Sektoren (insbesondere Energie) | - sich die Wasserversorgung in ein lokales Lastmanagement einbinden lässt.<br>- vorsorgende Gewässerschutzleistungen anderer Sektoren (z.B. Landwirtschaft) gezielt gefördert werden können. |
| | keine problematischen Materialien | - Umweltrisiken gering ausfallen.<br>- die Verwendung seltener Materialen und entsprechender Öko-Fußabdruck gering ausfallen. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Je nach Bundesland als freiwillige oder pflichtige Selbstverwaltungsaufgabe normiert.

2 Grundsätzlich bietet das Recht wegen der strengen Hygieneanforderungen nur begrenzte Möglichkeiten zur Aufgabenübertragung auf private Dritte.

3 Diese sind rechtlich über das Institut des Anschluss- und Benutzungszwangs gesichert.

4 Bis auf wenige Ausnahmen überregionaler Fernversorgungssysteme.

### Schwächen der Wasserversorgung

- Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 15: Schwächen der Wasserversorgung

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | keine abgestimmten, nationalen Planungen | - strategische/nationale Orientierung für die lokale Ausgestaltung von Ressourcenleichtigkeit fehlt.<br>- keine einheitlichen/staatlichen Förderprogramme aufgelegt werden. |
| | institutionelle und rechtliche Komplexität und Zersplitterung[1] | - durch (technische) Innovationen hervorgerufene notwendige Anpassung im Rechtsrahmen nur schwer umsetzbar sind.<br>- Zuständigkeiten (insb. bei Innovationen) z.T. ungeklärt sind. |
| | kleinteilige (Unternehmens-) Struktur | - in kleinen Unternehmen kaum das notwendige Wissen für innovative, strategische Planungen und damit für eine ressourcenleichte Umgestaltung vorliegen dürfte.<br>- Synergie- und Skaleneffekte nicht gehoben werden. |
| Ökonomische Faktoren | Tarifsystem korrespondiert nicht mit hohem Fixkostenanteil | - die Finanzierungsgrundlage (insbesondere in Schrumpfungsregionen) gefährdet ist. |
| | sunk costs[2] | - Pfadabhängigkeiten bestehen. |
| Technische Faktoren | systemfremde Leistungen werden erbracht (Löschwasserbereithaltung, Grundwasserregulierung) | - Pfadabhängigkeiten vorliegen, die Anpassungen /Weiterentwicklungen in anderen Systemen erfordern. |
| | hohe Pfadabhängigkeiten | - |
| | technische Innovationen setzen sich kaum durch (Konservatismus) | - damit Alternativen für ressourcenleichte Wasserinfrastrukturen in der Praxis fehlen. |
| | begrenzte Flexibilität bei der kurzfristigen Anpassung (da oftmals mit hohen Kosten verbunden) | - weil demografischer Wandel, siedlungsstrukturelle Trends und der Klimawandel Anpassungen der Systeme erfordern<br>- und im Zuge dessen Trinkwasserbedarfe sich kleinräumiger und zeitlich differenzierter abbilden können. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Zuständigkeiten im Mehrebenensystem des Föderalismus und vielfältigen, zuständigen Behörden.

2 „Mit sunk costs (versunkene Kosten) werden Investitionen bezeichnet, die erforderlich sind, um auf einem Markt als Unternehmen aktiv werden zu können, die aber bei einem Marktaustritt nicht mehr rückholbar sind“ (Kluge, Scheele 2003, S.18).

**Risiken im Zusammenhang mit der Wasserversorgung**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 16: Risiken im Zusammenhang mit der Wasserversorgung

| Risiken | Begründung, Erläuterungen „Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| siedlungsstrukturelle Trends führen zu weiterer Entdichtung der Netze (Relation Kunde zu Netzlänge verschlechtert sich) | - der Betrieb bestehender Netze pro Kopf kostspieliger wird und damit finanzielle Spielräume für Anpassung/Weiterentwicklung fehlen.<br>- Infrastruktur nicht einfach zurückgebaut werden kann und die Ressourcen (Material, Energie, Fläche) gebunden sind. |
| Haushaltskrise der Kommunen (Schuldenbremse) | - der finanzielle Handlungsspielraum vor Ort für strategische Planungen und Investitionen in ressourcenleichte Umgestaltungen fehlt.<br>- finanzieller Spielraum in der Wasserversorgung nicht beliebig über eine Erhöhung der Gebühren und Tarife gewonnen werden kann. |
| Klimawandelauswirkung schlagen unmittelbar auf Wasserdargebot und -nachfrage durch | - Wasser (in Regionen mit Wasserstress) zukünftig ggf. über größere Distanzen transportiert werden muss und dazu neue Infrastrukturen benötigt werden.<br>- weil im Sommer der Wasserbedarf steigt und damit der Bedarf an Infrastrukturausstattung. |
| TTIP, CETA verändern institutionelle Grundlagen der Wasserversorgung | - ggf. grundlegende Entscheidungen über künftige Gestaltungen der Wasserversorgung nicht mehr vor Ort getroffen werden können.<br>- der institutionelle Rahmen weiter an Komplexität gewinnt und Barrieren für ressourcenleichte Innovationen aufzieht. |
| Nitratbelastung und anthropogene Spurenstoffe im Rohwasser | - zusätzliche technische Maßnahmen notwendig werden, um Rohwasser für Trinkwasserzwecke aufzubereiten (Kosten).<br>- zusätzliche technische Maßnahmen notwendig werden, um Nitrat und Spurenstoffe aus dem Rohwasser zu entfernen (Kosten). |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.2.2 SWOT-Analyse der Abwasserentsorgung

**Stärken der Abwasserentsorgung**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 17: Stärken der Abwasserentsorgung

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Kommunale Pflichtaufgabe (Daseinsvorsorge) | - Aufgabe und Aufgabenträgerschaft rechtlich abgesichert sind.<br>- Ressourcenzuweisung im kommunalen Haushalt damit gegeben ist.<br>- über notwendige Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung vor Ort entschieden werden kann.<br>- bürgerschaftliche und demokratisch legitimierte Kontrolle über und für die Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung gegeben ist. Dies bietet Richtungssicherheit.<br>- die Abwasserentsorgung damit keinem wettbewerblichen, von außen getriebenen Regime unterliegt. |
| | National bzw. Bundesland einheitlich geregelte, rechtliche, technische und organisatorische Normen | - damit Dienstleistungs- und Umweltqualitäten gesichert werden.<br>- damit auch Tarife und Gebühren kontrolliert werden. |
| | Hohe gesellschaftliche Akzeptanz | - hierin Dienstleistungen hoher Qualität auf Basis funktionierender Organisationsmodelle und Know-how (Wissen, Technik) in Unternehmen zum Ausdruck kommt.<br>- die Abwasserunternehmen Vertrauen genießen und als Träger des Gemeinwohls verstanden werden.<br>- hohe Anforderungen an Qualität der Entsorgung, Umwelt- und Hygienevorsorge eingefordert werden. |
| Ökonomische Faktoren | Sinkende Kosten pro EW bei zunehmender Ausbaugröße (Skaleneffekte) | - der kommunale Haushalt dadurch entlastet wird.<br>- auch der Energieverbrauch pro Einwohner und Jahr mit zunehmender Ausbaugröße der Kläranlage sinkt. |
| | Kostendeckungsprinzip | - die Finanzierungsgrundlage auch in Zeiten der Anpassung/Weiterentwicklung vorgeschrieben ist.<br>- Infrastrukturen nicht dauerhaft auf Verschleiß gefahren werden können.<br>- Anforderungen europäischen Rechts (Art. 9 WRRL) erfüllt werden |
| Technische Faktoren | Hohe Anschlussgrade | - weil ein weiterer signifikanter Ausbau der Netze nicht erforderlich ist.<br>- hohe Qualitäten und Sicherheiten der Abwasserentsorgung gegeben sind. |
| | Lokal begrenzte Infrastruktursysteme | - über notwendige Entscheidungen zur Anpassung/Weiterentwicklung vor Ort entschieden werden kann. |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | | - keine überregionalen Infrastrukturen gebaut werden müssen.<br>- Energieaufwendungen für den überregionalen Transport entfallen. |
| | Hohe Lebensdauer von wesentlichen Teilkomponenten | - die Ressourceninanspruchnahme für den Bau der Infrastrukturen über viele Jahre diskontiert werden kann. (rechnerische Ressourcenleichtigkeit) |
| | Zusatznutzen aus Systemkopplungen (Energie und IKT) | - sich die Abwasserentsorgung in ein lokales Lastmanagement einbinden lässt.<br>- Energiepotenziale im Abwasser gehoben werden können.<br>- die Abwasserentsorgung sich vom Energiekonsumenten zum Energieversorger entwickeln könnte.<br>- Abwasserkanäle potenziell als Stränge für andere Leitungen/Kabel genutzt werden können.[1] |
| | Techniken zur (inkrementellen) Weiterentwicklung bestehender Systeme vorhanden (Optimierung) (z.B. Membranfilter) | - vielfältige (technische) Systemvarianten und Lösungen vorliegen und zum Einsatz kommen.<br>- auch in der Sanierung und Instandhaltung ressourcenleichte Techniken vorliegen (Inline-Verfahren, 2-in-1 Lösungen; grabenlose Rohrverlegung, etc.)<br>- auf neue Herausforderungen zum Gewässerschutz (z.B. Frachtenreduzierung Mikroschadstoffe) flächendeckend Einfluss genommen werden kann. |
| | Techniken zur tiefgreifenden Veränderung vorhanden (Transformation) (u.a. NASS wie z.B. Trockentoiletten, oder Vakuumsysteme) | - vielfältige (technische) Lösungen vorliegen, die neue Ressourceneffizienzpotenziale erschließen können.<br>- damit grundlegend neue Formen der Abwasserentsorgung denkbar sind. |
| | Funktionsstörungen auf lokale (Teil-) Netze begrenzt | - die negativen Folgen für Umwelt und Bevölkerung sich (i.d.R.) regional begrenzen lassen.[2] |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Konkret hat die Breitbandstrategie des BMVI die Abwasserrohre zur Verlegung von IKT-Breitbandkabeln im Blick. Allerdings ist diese Kopplung bei den Abwasserverbänden nicht unumstritten.

2 Je nach Schwere der Funktionsstörung können Gewässer über einen größeren Raum (Transport über Flüsse, evtl. Grundwasser) belastet werden (z.B. Mischwasserüberläufe).

### Schwächen der Abwasserentsorgung

- Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 18: Schwächen der Abwasserentsorgung

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…..“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | keine nationalen Planungen und Strategien zum Aus- und Umbau | - strategische/nationale Orientierung für die lokale Ausgestaltung von Ressourcenleichtigkeit fehlt.<br>- keine einheitlichen/staatlichen Förderprogramme aufgelegt werden. |
| | kleinteilige Anbieter-/Trägerstruktur | - in kleinen Unternehmen nicht das notwendige Wissen für innovative, strategische Planungen und damit für eine ressourcenleichte Umgestaltung vorliegen dürfte.<br>- Synergie- und Skaleneffekte nicht gehoben werden. |
| | kein Wettbewerb (fehlender Innovationsmotor) | - wirtschaftliche Anreizstrukturen zur Effizienzsteigerung und Innovation fehlen. |
| | eingeschränkter (Informations-)Zugang zu Teilen des Infrastruktursystems (private Hausanschlüsse) | - damit Teile der Infrastruktur nicht der öffentlichen Planung, Gestaltung und Kontrolle unterliegen. |
| Ökonomische Faktoren | hoher Fixkostenanteil | - die Finanzierungsgrundlage (insbesondere in Schrumpfungsregionen) gefährdet ist. |
| | lange Abschreibungszeiträume | - Pfadabhängigkeiten bestehen, da einmal getroffene Investitionsentscheidungen kurzfristig aus Kostengründen nicht revidiert werden. |
| Technische Faktoren | geringe Flexibilität des bestehenden Systems (Flexibilität meint hier kurzfristige Reaktionsmöglichkeit auf schwankende bzw. sich abrupt einstellende Stoffströme/Lasten im System (z.B. Starkregen); gemeint ist nicht die bauliche Anpassung) | - im Zuge des demografischen Wandels und insb. des Klimawandels höhere Flexibilität im System erforderlich ist.<br>- eine Steigerung der Flexibilität mit zusätzlichen baulichen Maßnahmen (Ressourceninanspruchnahme, Kosten) verbunden ist.<br>- die Nutzung von Ressourcen- und Energiepotenziale im System gehemmt wird. |
| | gegenüber plötzlichen Störungen (z.B. Starkregenereignisse) nur begrenzt anpassungsfähig | - es zu Störungen und Funktionsausfällen im System kommen kann.<br>- es zu negativen Folgen für die Umwelt kommen kann. |
| | teilweise geringe Redundanzen | - Systemausfälle nicht abgepuffert werden können. |
| | Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern | - Anstrengungen (auch baulicher Art) und Mehraufwand (Energie) notwendig sind, um die Abwasserbehandlung zu verbessern. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Chancen im Zusammenhang mit der Abwasserentsorgung

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 19: Chancen im Zusammenhang mit der Abwasserentsorgung

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| Verknappung fossiler Brennstoffe | - die Frage der Energieeffizienz des Systems in den Blick gerät und Optimierungen nahelegt. |
| steigende Rohstoffpreise bei Phosphat und Nitrat und Endlichkeit der Phosphatvorräte | - sich neue Geschäftsfelder und Produktlinien (etwa Wertstoffrückgewinnung und Verkauf) für Abwasserunternehmen eröffnen und<br>- neue Technologien ökonomisch rentabel eingeführt werden können. |
| demografischer Wandel - Wachstum (steigende AW-Mengen) in Teilbereichen | - Innovationsimpulse für die technische Anpassung gesetzt werden. |
| intelligente Systemlösungen und technologischer Wandel insb. auf Kläranlagen und ihren Komponenten mit Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz | - Umgestaltung/Transformation der Abwasserinfrastrukturen (in Nischen) erprobt ist.<br>- sich damit Kopplungen zu den Energieversorgungsinfrastrukturen ergeben.<br>- Kläranlagen vom Energieverbraucher zum -erzeuger werden können. |
| zunehmende Sensibilität für externe Kosten aufgrund nicht beabsichtigter Nebenwirkungen eigenen Handelns | - Folgen wie die Spurenstoff-Problematik thematisiert werden können. |
| verbreitete Diskurse nachhaltiger Entwicklung | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems provoziert werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden.<br>- Bürger und Politiker Fragen des Umwelt- und Ressourcenschutzes thematisieren. |
| Energiefrage gerät in den Fokus der SWW | - Fragen nach der Effizienz des bestehenden Systems provoziert werden.<br>- Innovationsimpulse gesetzt werden. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken im Zusammenhang der mit Abwasserentsorgung**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 20: Risiken im Zusammenhang mit der Abwasserentsorgung

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| demografischer Wandel - Schrumpfung (sinkende AW-Mengen) in Teilbereichen | - die Netze und Anlagen nicht adäquat ausgelastet sind und z.T. Funktionsschwellen unterschritten werden.<br>- bauliche Anpassungen (Ressourcenaufwendungen) vor Erreichen der technischen Lebensdauer notwendig werden. |
| Klimawandel - häufiger Starkregen oder zunehmende Trockenheit | - neue Abwasserinfrastrukturen gebaut werden müssen, um mit Klimawandel umzugehen. (sofern nur auf technische Lösungen gesetzt wird).<br>- in Trockenperioden es zu geringer Auslastung kommen kann. |
| gesellschaftlicher Wandel (sinkende AW-Mengen durch Wassersparen) | - die Netze und Anlagen nicht adäquat ausgelastet sind und z.T. Funktionsschwellen unterschritten werden.<br>- bauliche Anpassungen (Ressourcenaufwendungen) vor Erreichen der technischen Lebensdauer oder der vollständigen Abschreibung notwendig werden. |
| siedlungsstruktureller Wandel (Verschlechterung des Verhältnisses von Leitungslänge und angeschlossenen Einwohnern) | - der Betrieb bestehender Netze pro Kopf kostspieliger wird und damit finanzielle Spielräume für Anpassung/Weiterentwicklung fehlen.<br>- Infrastruktur nicht einfach zurückgebaut werden kann und die Ressourcen (Material, Energie, Fläche) gebunden sind.<br>- bauliche Anpassungen (Ressourcenaufwendungen) vor Erreichen der technischen Lebensdauer oder der vollständigen Abschreibung notwendig werden. |
| finanzielle Lage der kommunalen Aufgabenträger | - der finanzielle Handlungsspielraum vor Ort für strategische Planungen und Investitionen in ressourcenleichte Umgestaltungen fehlt.<br>- finanzieller Spielraum in der Abwasserentsorgung nicht beliebig über eine Erhöhung der Gebühren und Tarife gewonnen werden kann. |

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| sinkende Akzeptanz zusätzlicher öffentlicher Abgaben / Gebühren / Steuern (aufgrund des bereits hohen Niveaus) | - die Finanzierung strategischer Planungen und Investitionen in ressourcenleichte Umgestaltungen nicht über Gebühren finanziert werden kann.<br>- finanzieller Spielraum in der Abwasserentsorgung nicht beliebig über eine Erhöhung der Gebühren und Tarife gewonnen werden kann. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 1.3 Verkehr – SWOT-Analyse der Infrastruktursysteme Straßen-, Schienen-, Luftverkehre und Binnenschifffahrt

### 1.3.1 SWOT-Analyse Straße

**Stärken**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 21: Stärken Straße

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | zentrale Planung für Bundesfernstraßen | - eine bedarfsgerechte übergeordnete Planung möglich ist. |
| | hoheitliche Pflichtaufgabe (Daseinsvorsorge) | - Bewältigung der Herausforderung in Regionen mit "demographischer Relevanz" Priorität gewinnt. |
| | hohes Ertragspotenzial | - eine nutzergerechte Finanzierung möglich ist.<br>- finanzielle Spielräume für Investitionen in die Umgestaltung bestehen. |
| | großteils Finanzierung aus Steuermitteln (Staat) | - demokratische Legitimierung von Infrastrukturprojekten besteht.<br>- sachgemäße Steuerung des Mittelflusses mit Fokus auf Ressourcenleichtigkeit möglich ist.<br>- Steuerung der Finanzmittel unter Berücksichtigung des Instandhaltungszustandes der Infrastruktur möglich ist. |
| Ökonomische Faktoren | generell relativ geringer Fixkostenanteil | - Verkehrsverlagerung auf den Schienenverkehr die Infrastruktur entlastet und mit sinkenden Kosten einhergeht. |
| Technische Faktoren | flächendeckend dichtes Netz | - Mobilitätsoptionen für nahezu die gesamte Gesellschaft angeboten werden.<br>- grundsätzlich nur geringe Netzerweiterungen notwendig sind.<br>- ein hohes Maß an Redundanz besteht. |
| | hohe Flexibilität bestehender Komponenten | - Infrastruktur neben dem motorisierten Individualverkehr auch durch ressourcenleichte Mobilität wie mit dem Fahrrad, Elektrofahrrad, zu Fuß und durch den ÖPNV genutzt werden kann.<br>- neben dem Straßenverkehr eine Reihe von weiteren verkehrsfremden Nutzungsfunktionen bestehen.<br>- durch hohes Maß an Redundanz flexibler Betrieb möglich ist. |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | vorhandene Redundanzen | - die Auswirkungen von Störfällen vergleichsweise gering ausfallen. |
| | Optionen zur Weiterentwicklung bestehender Systeme | - Anpassungen der Nutzung zu Infrastrukturentlastungen führen.<br>- Kapazitätsengpässen durch Optimierungen im System statt Systemerweiterungen begegnet werden.<br>- die Nutzung fossiler Energieträger im Betrieb durch eine Elektrifizierung und Verwendung von synthetischen Kraftstoffen reduziert werden kann.<br>- Lärm- und Schadstoffbelastung der Anlieger durch neue technische Entwicklungen verringert werden können. |
| | Kopplungsfähigkeit zu anderen Infrastruktur-Bereichen | - durch multimodale Mobilitätskonzepte Stärkung des Umweltverbundes möglich ist.<br>- Verlagerungsmöglichkeiten im Güterverkehr bestehen. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Schwächen**

- Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 22: Schwächen Straße

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Akzeptanzprobleme | - bei Neubauvorhaben häufig Konflikte mit Anwohnern entstehen. |
| Ökonomische Faktoren | ineffiziente Finanzierungstruktur | - die aktuelle Priorisierung nach Kosten- Nutzen-Verhältnis anfällig für Fehlsteuerung ist.<br>- Grundlage der Verteilung der finanziellen Mittel zwischen Ländern und Kommunen nicht bedarfsgerecht ist. |
| Technische Faktoren | vergleichsweise (energie-) ineffizienter Verkehrsträger | - Verknappung fossiler Energieträger erwartet wird.<br>- weiterhin mit hohem Verkehrswachstum insbesondere im Güterverkehr gerechnet wird. |
| | schlechter baulicher Zustand | - hoher Ressourcenbedarf für Instandhaltungsmaßnahmen besteht. |
| | Dominanz fossiler Treibstoffe | - hohe Treibhausgasemissionen verursacht werden.<br>- alternative Antriebskonzepte sich nur langsam etablieren.<br>- Abhängigkeit von erdölexportierenden Staaten besteht. |
| | hohe Flächeninanspruchnahme | - Flächenzersiedlung und -zerschneidung die Folge von neuen Infrastrukturprojekten sind.<br>- es sich um den Verkehrsträger mit der höchsten spezifischen Flächeninanspruchnahme handelt. |
| | hohe Lärmemissionen | - weite Teile der Bevölkerung von gesundheitsschädigenden Lärmbelastungen (Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen) betroffen sind.<br>- gestiegene Sensibilität für Lärmbelästigungen zunehmend zu Konflikten führt. |
| | lokale und temporäre Überlastungen der Infrastruktur | - hoher Energieverbrauch und Opportunitätskosten durch Verkehrsstau.<br>- der Ausbau der Infrastruktur und einhergehende Verkürzungen der Reisezeit zusätzlichen Verkehr induziert.<br>- der zunehmende Verkehrsaufwand im Güterverkehr das Problem verstärken dürfte. |
| | Verkehrsträger mit der höchsten Ressourceninanspruchnahme | - trotz des 30 ha Ziels weiter Infrastruktur ausgebaut wird.<br>- spezifischer Aufwand durch die Instandhaltung des vorhandenen Netzes bei Rückgang der Bevölkerungszahl weiter steigt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Chancen

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 23: Chancen Straße

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| Lärmaktionsplanung / Luftreinhalteplanung | - die negativen Auswirkungen des Straßenverkehrs verringert werden.<br>- Verkehrsmittel mit geringerer Lärmbelastung begünstigt werden.<br>- im innerstädtischen Verkehr mit einer Elektrifizierung auch lokale Lärm- und Schadstoffminderung einhergehen kann.<br>- die Akzeptanz von notwendigen Infrastrukturprojekten durch Lärmschutzmaßnahmen verbessert werden kann. |
| gesellschaftlicher Wandel - Änderung des Mobilitätsverhaltens | - steigende Nachfrage nach Lösungen für multimodaler und bedarfsgerechter Mobilität besteht.<br>- Abnahme der täglichen Pkw-Nutzung bei jungen Menschen und steigendes Durchschnittsalter beim Kauf von Neuwagen für ein abnehmendes Interesse am MIV sprechen.<br>- Bewusstseinswandel vom Statussymbol hin zum Gebrauchsgegenstand beim Pkw gesehen wird. |
| technologischer Wandel - steigende Nachfrage nach digitalen Angeboten | - neue Anbieter von digitalen Lösungen Dynamik in den Markt bringen.<br>- neue Formen der geteilten Fahrzeugnutzung wie stations-ungebundenes Carsharing und Ridesharing sich durchsetzen. |
| technologischer Wandel - intelligente Verkehrsnetze, Elektroverkehr, autonomes Fahren | - durch intelligente Netze und Car2Car Kommunikation Kraftstoffverbrauchsminderungen erzielt werden könnten.<br>- autonom fahrende Fahrzeuge einen weiteren Baustein in einer bedarfsgerechten multimodalen Mobilität darstellen können.<br>- intelligente Netze eine optimale Auslastung der gegebenen Infrastruktur ermöglichen könnten, wodurch sich Ausbaumaßnahmen reduzieren lassen.<br>- zunehmend technische Optionen bestehen, erneuerbar erzeugten Strom im Straßenverkehr einzusetzen.<br>- Elektrifizierung des Straßenverkehrs durch gesteuerte Ladung o.ä. die Fluktuationen in der Stromerzeugung puffern könnte.<br>- die Verwendung stromgenerierter synthetischer Kraftstoffe denkbar ist |
| nutzengerechte Finanzierung | - eine Finanzierung nach dem Verursacherprinzip und dem Nutznießer-Prinzip die Kostenwahrheit zwischen den Verkehrsträgern fördert. |

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| zunehmende Sensibilität für externe Kosten und Trend zu mehr Nachhaltigkeit | - die Entwicklung innovativer Lösungen gestärkt wird.<br>- Herstellung einer Kostenwahrheit ressourcenleichte Verkehrsmittel stärkt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Risiken

► Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 24: Risiken Straße

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| Klimawandel | - durch Hitzeschäden (z.B. Blow up) oder andere Folgen des Klimawandels (wie z.B. Spurrinnenbildung) ein erhöhter Instandhaltungsaufwand nötig werden kann.<br>- die Wahrscheinlichkeit von Wetterextremereignissen und ihren Folgen für Straßeninfrastruktur (z.B. Überschwemmungen) steigt. |
| Verknappung fossiler Rohstoffe - Preissteigerung fossiler Brennstoffe | - Abnahme der Nutzungsintensität aufgrund höherer km-Kosten aufgrund der langen Planungszeit und Lebensdauern der Verkehrsinfrastruktur, welche zu einer nicht bedarfsgerechten Infrastruktur führen könnte.<br>- die Baustoffqualität beim Asphalt durch Optimierungen bei der Kraftstofferzeugung abnehmen könnte.[1] |
| weiter zunehmender Verkehrsaufwand | - Netzerweiterungen mit hohen Ressourcenbedarf die Folge sein können.<br>- die Beanspruchung der Straßen und Bauwerke durch eine höhere Belastung steigt.<br>- die Treibhausgasemissionen des Verkehrssektors ansteigen können. |
| demographischer Wandel | - neue bauliche Anforderungen an Barrierefreiheit binden finanzielle Mittel. |
| Demografischer und siedlungsstruktureller Wandel | - steigendes Verkehrsaufkommen in Wachstumsgebieten ressourcenintensive Infrastrukturerweiterungen notwendig machen können, um Engpässe zu beseitigen.<br>- zurückgehende Nutzung in Schrumpfungsregionen lokal Überkapazitäten und damit unnötige Wartungs- und Instandhaltungskosten entstehen können. |
| finanzielle Handlungsspielräume | - finanzielle Lage der Kommunen teilweise äußerst angespannt ist und durch den demografischen Wandel verstärkt wird.<br>- Mittel für für Neu- und Ausbau verwendet werden, welche für Instandhaltung und Modernisierung. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Informationen aus dem Beirat des UBA Projektes „Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau…“ FKZ 3712 33 324: Laut der Straßenbauämter lässt sich eine Abnahme der Klebeigenschaften des Bitumens beobachten, welche laut Aussage des Beirats durch zunehmende Qualität der Vakuumdestillation in der Erdölraffinerie zu erklären ist. Der hierbei entstehende Vakuumrückstand kann direkt als Bitumen verwendet werden, ist aber nicht Ziel des Destillationsprozesses. Bei Prozessoptimierung hin zu Vakuumgasölen, aus denen dann leichte Kohlenwasserstoffe hergestellt werden, leidet die Qualität des Rückstandes.

### 1.3.2 SWOT-Analyse der Schiene

Die SWOT-Analyse des Schienenverkehrs bezieht sich auf Schienenfern- sowie -nahverkehr.

**Stärken**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 25: Stärken Schiene

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>"Ist eine Stärke, weil…" |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | überwiegend zentrale Planung | - eine integrierte Planung unter Berücksichtigung der anderen Verkehrsträger ermöglicht wird. |
| | hohe gesellschaftliche Akzeptanz | - hierin funktionierende Organisation und Know-how in Unternehmen zum Ausdruck kommt.<br>- zunehmendes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung die Nutzung der Bahn unterstützt.<br>- weiterer Ausbau der Qualität |
| | hoheitliche Pflichtaufgabe (Daseinsvorsorge) | - Regionen betroffen vom demographischen und siedlungsstrukturellen Wandel Möglichkeiten für nachhaltige Mobilität erhalten. |
| | zentrales Betriebsmanagement im Netz | - im Fall von Betriebsstörungen eine Reaktion mit Blick auf das Gesamtsystem erfolgen kann.<br>- die für eine Anpassung der Betriebskonzepte notwendigen eingebundenen Akteure vergleichsweise überschaubar sind. |
| Ökonomische Faktoren | Finanzierung der Infrastruktur aus Steuermitteln | - Betrieb auch in Regionen sichergestellt ist, die für sich nicht wirtschaftlich darstellbar wäre. |
| Technische Faktoren | Optionen zur Evolution bestehender Systeme | - kontinuierliche Verringerung der Lärmbelastung die Akzeptanz weiter steigert.<br>- durch optimierte Betriebskonzepte bestehende Infrastruktur besser genutzt werden kann.<br>- bessere Integration in multimodale Mobilitätskonzepte ermöglicht wird. |
| | zusammenhängendes umfassendes Netz | - Potentiale zur Verlagerung von Verkehren auf die Schiene bestehen. |
| | dichtes Netz in Ballungsräumen | - gute Anschlussfähigkeit an den Nahverkehr sichergestellt ist. |
| | 2/3 des Netzes elektrifiziert | - ein hoher Anteil des Verkehrsaufwandes heute schon elektrisch erbracht wird.<br>- direkte Nutzung von Strom eine einfache Möglichkeit einer dekarbonisierten[1] Mobilität eröffnet.<br>- Nutzung von Strom die lokalen Luftschadstoffemissionen reduziert. |
| | energieeffizienter Verkehrsträger | - nimmt im Betrieb verhältnismäßig wenig Ressour- |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>"Ist eine Stärke, weil…" |
|---|---|---|
| | | cen in Anspruch. |
| | klimafreundlicher Verkehrsträger | - zunehmende Wahrnehmung der Relevanz von Klimaschutzmaßnahmen den Verkehrsträger Bahn stärkt.<br>- Langfristszenarien zeigen, dass die $CO_2$-Emissionen des Verkehrssektors nahezu vollständig vermieden werden müssen.<br>- durch Bezug von regenerativ erzeugtem Strom dies bereits im bestehendem System zu weiten Teilen möglich ist. |
| | überwiegend lange Nutzungsdauern | - spezifische Ressourceninanspruchnahme für Infrastruktur und Fahrzeuge verhältnismäßig gering ausfällt.<br>- Planungssicherheit nach Infrastrukturprojekten besteht. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

1 Unter Dekarbonisierung wird die Abkehr von der Nutzung kohlenstoffhaltiger, fossiler Energieträger verstanden.

### Schwächen

► Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 26: Schwächen Schiene

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Schwäche, weil…" |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Akzeptanzprobleme durch externe Effekte (Lärm, …) | - hohe Kosten, die durch Minderungsmaßnahmen verursacht werden.<br>- Ausbau des Netzes auf Widerstand stößt. |
| Ökonomische Faktoren | vergleichsweise geringes freies Ertragspotenzial | - Bahnfahren bereits heute als zu teuer wahrgenommen wird.<br>- konkurrierende Verkehrsträger wie der Fernbus strukturell bevorteilt werden. |
| | hoher Fixkostenanteil | - zurückgehende Auslastungen zu höheren spezifischen Kosten führen. |
| Technische Faktoren | in Teilbereichen nicht bedarfsgerecht ausgebaut | - Verlagerungspotentiale im Güterverkehr nicht realisiert werden können.<br>- Nutzung teilweise unattraktiv ist. |
| | Störanfälligkeit nach Abbau von Ausgleichkapazitäten | - Redundanz weiter verringert wird.<br>- Störfälle die Akzeptanz verringern. |

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen<br>„Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| | teilweise fehlende Flächenerschließung | - Nutzung anderer Verkehrsträger mit höherem Ressourcenaufwand verstärkt wird.<br>- Anschluss ans Fernverkehrsnetz fehlt. |
| | geringe Flexibilität bestehender Komponenten | - kaum alternative Nutzungsmöglichkeiten der Infrastruktur bestehen. |
| | geringe Redundanzen | - bei Störfällen wie z.B. Überschwemmungen mit Ausfällen und höheren Reisezeiten gerechnet werden muss.<br>- technische Probleme im rollenden Material Streckenabschnitte blockieren kann.<br>- aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes einzelner Infrastrukturkomponenten Ausfälle wahrscheinlicher werden. |
| | 1/3 des Netzes NICHT elektrifiziert | - Dieseltraktion zu höheren Endenergieverbräuchen und lokalen Luftschadstoffemissionen führt, zudem fossile Brennstoffe verbraucht.<br>- die Elektrifizierung weiterer Streckenabschnitte mit geringeren Auslastungen wirtschaftlich nicht darstellbar ist.<br>- Dieseltraktion unter Fahrdraht durchgeführt wird. |
| | schlechter Zustand bei Brücken | - Zuverlässigkeit im Schienenverkehr gefährdet ist.<br>- die Instandsetzung hohe Investitionen voraussetzt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Chancen

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 27: Chancen Schiene

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| höhere Sensibilität hinsichtlich Lärmbelastungen | - durch die Lärmaktionsplanung 2020 Ziele definiert sind.<br>- Erhöhung der Akzeptanz erzielt werden kann.<br>- technische Potentiale zur Lärmminderung bestehen. |
| Verknappung fossiler Rohstoffe - Preissteigerung fossiler Brennstoffe | - ein großer Anteil der Fahrleistung elektrisch erbracht wird.<br>- Umstieg auf erneuerbare Energien vergleichsweise einfach umgesetzt werden kann. |
| höheres Verkehrsaufkommen in Wachstumsgebieten. | - eine bessere Auslastung die Wirtschaftlichkeit erhöht und die spezifischen Emissionen verringert. |
| gesellschaftlicher Wandel - Änderung des Mobilitätsverhaltens | - die Führerscheinquote bei jungen Menschen kontinuierlich zurückgeht.<br>- Schienenverkehr wichtige Rolle in multimodalen Mobilitätskonzepten spielt.<br>- Schienenverkehr als umwelt- und ressourcenschonend wahrgenommen wird. |
| technologischer Wandel - Steigende Nachfrage nach digitalen Angeboten | - Echtzeitinformationen zu Fahrplänen und Zugverspätungen eine verlässlichere Auswahl des Verkehrsmittels ermöglichen.<br>- flexiblere Logistikprozesse im Schienenverkehr möglich werden. |
| technologischer Wandel - Intelligente Verkehrsnetze | - die optimierte Betriebsführung die Attraktivität steigert.<br>- durch eine Verringerung der Zugabstände Infrastruktur intensiver genutzt werden könnte. |
| verbreitete Diskurse nachhaltiger Entwicklung | - Akzeptanz der Bahn weiter steigt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Risiken

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 28: Risiken Schiene

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| demographischer Wandel - Neue Anforderungen an Infrastrukturen | - Infrastruktur teilweise nicht mehr bedarfsgerecht ist.<br>- ein abnehmendes Verkehrsaufkommen in Schrumpfungsgebieten zu weiteren Streckenstilllegungen führen kann. |
| siedlungsstruktureller Wandel | - ein abnehmendes Verkehrsaufkommen in sich entdichtenden Räumen zu weiteren Streckenstilllegungen führen kann.<br>- der hohe Fixkostenanteil die Fahrkosten weiter erhöht. |
| Klimawandel | - die Wahrscheinlichkeit von Störungen des Systems durch Wetterextremereignisse steigt.<br>- die Beanspruchung der Infrastruktur (insb. infolge von Hitze) sich verstärkt. |
| finanzielle Handlungsspielräume | - finanzielle Lage der Kommunen den Handlungsspielraum einschränkt und durch den demografischen Wandel, besonders in Schrumpfungsgebieten verstärkt wird.<br>- Mittel in Einzelprojekte fließen statt übergeordnetes Gesamtkonzept zu entwickeln. |
| weiter zunehmender Verkehrsaufwand | - bereits heute lokale Engpässe bestehen. |
| sinkende Akzeptanz zusätzlicher öffentlicher Abgaben / Gebühren / Steuern | - Notwendige Projekte |
| weiterer Abbau von Kapazitätsreserven | - Redundanz verloren geht und damit einerseits die Möglichkeit, zukünftig mehr Verkehr zu tragen und andererseits die Auswirkungen von Störungen verstärkt werden. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.3.3 SWOT-Analyse der Luftfahrt

**Stärken**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 29: Stärken Luftfahrt

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | wirtschaftlicher Wettbewerb | - Wettbewerb zwischen Airlines Anreize zur Effizienzsteigerung und Innovation schafft.<br>- Wettbewerb mit anderen Verkehrsträgern breites Angebot und Redundanz schafft. |
| | zentrale Stelle für Zulassung, Genehmigung und Aufsicht, Planung | - neue technische Anforderungen (bspw. an Lärm) einfach umgesetzt werden können.<br>- veränderten Sicherheitsbedürfnissen gerecht wird. |
| | Image | - positives Image weitere technische Innovationen begünstigt.<br>- zunehmende Wahrnehmung als Massenverkehrsmittel das Bewusstsein für die Relevanz der Umweltauswirkungen verstärkt.<br>- Klimawirksamkeit sowie gesundheitliche Risiken durch Lärm und Schadstoffe stärker in das Bewusstsein gelangt sind. |
| Ökonomische Faktoren | Kostendeckung/Erträge großer Flughäfen | - für sie ein wirtschaftlicher Betrieb ohne Unterstützung vom Staat möglich ist. |
| | Fixkostenanteil geringer als bei anderen Verkehrsträgern bei entsprechender Auslastung | - hoher Anteil an Betriebs- und Energiekosten Innovationen und Effizienzmaßnahmen begünstigen.<br>- Veränderungen bezüglich des Verkehrsaufwandes keine großen "Sunk Costs" nach sich ziehen. |
| Technische Faktoren | spezifisch geringer Versiegelungsgrad | - Ziele zur Reduzierung des Flächenverbrauchs bestehen.<br>- Biodiversität und regionale Wasserkreisläufe hohe Relevanz besitzen. |
| | vergleichsweise guter Erhaltungszustand | - prognostiziertes Wachstum ermöglicht wird. |
| | flexible "Streckenführung" | - Möglichkeit besteht, auf Störfälle zu reagieren. |
| | überwiegend lange Nutzungsdauern | - Infrastruktur und Flugzeuge zu geringen spezifischen Ressourcenverbräuchen führen.<br>- nacheinander unterschiedliche Nutzungsformen in Kaskaden möglich sind. |
| | Optionen zur Evolution bestehender Systeme (Optimierung) | - prognostiziertes Wachstum des Verkehrsaufwandes mit räumlich begrenzten Infrastrukturprojekten, größeren Flugzeugen und höherer Auslastung erbracht werden kann.<br>- große Effizienzpotentiale im Betrieb bestehen. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Schwächen**

- Welche **Schwächen** bringt das Luftverkehrs-System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 30: Schwächen Luftfahrt

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | strategische Bedeutung weniger, großer Flughäfen | - hohes Maß an Vulnerabilität z.B. bei Störfällen, Wetterextremereignissen besteht. |
| | Akzeptanzprobleme | - bei Neu- und Ausbauvorhaben mit Widerstand der Anwohner gerechnet werden muss.<br>- Schutz der Anwohner mit Kosten und Einschränkungen im Betrieb verbunden ist (Nachtflugverbot). |
| | Flächeninanspruchnahme | - hoher Flächeninanspruchnahme nahe Ballungsräumen mit hohen Grundstückskosten. |
| Ökonomische Faktoren | indirekte Subventionen | - Steuerbefreiung von Kerosin besteht. |
| | Finanzierung kleiner Flughäfen | - spezifische Vorhalteleistung bei geringem Verkehrsaufkommen groß ist. |
| | Ertragspotenzial | - hoher Kostendruck durch low cost carrier und internationale Airlines besteht. |
| Technische Faktoren | klimaschädlicher Verkehrsträger | - mittelfristig Klimaschutz hauptsächlich durch marktbasierte Instrumente (offset) umsetzbar scheint.<br>- langfristige Klimaschutzziele eine deutliche Emissionsminderung in der Luftfahrt voraussetzen.<br>- geringe Potentiale bestehen alternative Antriebskonzepte umzusetzen. |
| | Verkehrsträger mit hohem spezifischem Energieverbrauch | - mit deutlich steigenden Energiekosten gerechnet werden kann.<br>- zukünftig sehr große Bedarfe an Biokraftstoffen und synthetischen Kraftstoffen bestehen. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Chancen

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 31: Chancen Luftfahrt

| Chancen | Begründung, Erläuterungen<br>„Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| Trend zum Schutz vor Lärm | - Akzeptanz der Luftfahrt durch Lärmbegrenzungs- und überwachungsmaßnahmen steigt.<br>- neue Technologien und Betriebskonzepte mit geringeren Belastungen vorangebracht werden. |
| technologischer Wandel | - die digitale Vernetzung neue Logistikstrategien und multimodale Mobilitätskonzepte ermöglicht.<br>- intelligentes Routing möglich wird.<br>- neue Technologien (z.B. 3D-Druck) und neue Materialien in der Luftfahrt Anwendung finden.<br>- Kopplung mit dem Stromsektor über den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen ermöglicht wird.<br>- neue Flugzeugkonzepte durch Teilelektrifizierung denkbar werden. |
| zunehmende Sensibilität für externe Kosten und Trend zu mehr Nachhaltigkeit | - Druck auf die Gesetzgebung ausgeübt wird, weitere Regulierungen zur Minderung von Lärm-, Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen zu veranlassen.<br>- die Entwicklung marktbasierte Instrumente zur Minderung der THG-Emissionen auf internationaler Ebene voranbringt.<br>- Reduzierung der steuerlichen Bevorteilung der Luftfahrt angegangen werden kann. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 32: Risiken Luftfahrt

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| Wachstum des Verkehrsaufwands | - im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern guter Erhaltungszustand der Infrastruktur besteht.<br>- Veränderungen in der Betriebsführung weiteres Wachstum zulassen.<br>- Optionen zur Optimierung des Systems bestehen. |
| siedlungsstruktureller Wandel | - steigendes Verkehrsaufkommen in Wachstumsgebieten. |
| Wettbewerbsverzerrung zugunsten Luftverkehr | - Steuerbefreiungen den Verkehrsträger mit den höchsten spezifischen Treibhausgasemissionen begünstigt.<br>- Emissionen in der Luftfahrt in großen Höhen eine stärkere Treibhausgaswirkung entfalten. |
| Kapazitätsengpässe | - Luftraum unter heutigen Sicherheitsbetrachtungen punktuell bald schon ausgelastet ist.<br>- Flughäfen zu Spitzenzeiten überlastet sind. |
| gesellschaftlicher Wandel & Änderung des Mobilitätsverhaltens | - Anzahl von Städtereisen aufgrund der niedrigen Preise zunimmt.<br>- ein Rückgang nationaler Flüge eine Herausforderung für Regionalflughafen darstellen kann. |
| Verknappung fossiler Rohstoffe | - eine Preissteigerung bei fossilen Kraftstoffen erwartet wird.<br>- die Verfügbarkeit von alternativen Kraftstoffen fraglich ist.<br>- die Produktion von alternativen Kraftstoffen mit Nutzungskonflikten verbunden sein kann (z.B. Biokraftstoffe aus Energiepflanzen, Flächenkonkurrenz).<br>- eine Konkurrenz verschiedener Nutzungsformen für alternative Kraftstoffe erwartet wird (Straßengüterfernverkehr, Schifffahrt, Haushalte, Industrie). |
| Klimawandel | - damit eine stärkere Belastung der Infrastruktur und erhöhte Wahrscheinlichkeit von Wetterextremereignissen einhergehen kann. |
| abnehmende Bevölkerungszahlen in Schrumpfungsgebieten | - es Regionalflughäfen vor größere, schon bestehende ökonomische Herausforderungen stellt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### 1.3.4 SWOT-Analyse der Binnenschifffahrt

**Stärken**

- Welche **Stärken** kann das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt einbringen?

Tabelle 33: Stärke Binnenschifffahrt

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>"Ist eine Stärke, weil…" |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | überwiegend zentrale Planung (Binnenwasserstraßen) | - übergeordnete Planung unter Berücksichtigung von Bedarfsveränderungen möglich wäre (auch wenn eine Anpassung mit erheblichem Aufwand verbunden wäre). |
| Ökonomische Faktoren | Finanzierung aus Steuermitteln | - Förderung der Wasserstraßen aus langfristiger strategischer Sicht stattfinden kann. |
| | Konzentration der Investitionsmittel auf Strecken mit (momentaner) Verkehrsbedeutung | - Güterverkehrswachstum auch in der Binnenschifffahrt realisiert werden könnte.<br>- Infrastrukturplanung und -instandhaltung bedarfsgerecht umgesetzt wird. |
| Technische Faktoren | klimafreundlicher Verkehrsträger | - steigendes Bewusstsein für Relevanz von Klimaschutz.<br>- die Wasserstraßen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms Verwendung finden. |
| | überwiegend lange Nutzungsdauern | - die Schifffahrt geringe spezifische Ressourceninanspruchnahme aufweist.<br>- Binnenwasserstraßen auch verkehrsfremde Funktionen erfüllen, wie z.B. Wassermanagement |
| | vergleichsweise energieeffizienter Verkehrsträger | - vergleichsweise geringe Ressourceninanspruchnahme im Betrieb.<br>- Kostensteigerung der fossilen Energieträger weniger stark durchschlagen. |
| | Optionen zur Evolution bestehender Systeme (Optimierung) | - gegebene Infrastruktur an neue Anforderungen und Schiffstypen angepasst werden kann. (wenn auch mit erheblichem Aufwand)<br>- der Einsatz alternativer Kraftstoffe wie LNG und langfristig synthetisches Methan im Schiffsbetrieb denkbar ist.<br>- Transportgeschwindigkeiten zur Effizienzsteigerung reduziert werden können. |
| | Konzentration der Investitionsmittel auf Strecken mit (momentaner) Verkehrsbedeutung | - Güterverkehrswachstum auch in der Binnenschifffahrt realisiert werden könnte.<br>- Infrastrukturplanung und -instandhaltung bedarfsgerecht umgesetzt wird. |
| | hohe Akzeptanz des Verkehrsträgers | - Innovationen und steigende Schiffsgrößen verringern die spezifischen Energieverbräuche und Frachtraten und erhöhen die Akzeptanz.<br>- andererseits ist der Wasserstraßenausbau nicht unumstritten |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen<br>“Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | verkehrsfremde Funktionen von Binnenwasserstraßen | - die multifunktionale Nutzung der Wasserstraßen z.B. für die Be- und Entwässerung, Naherholung, Fischerei und als Vorfluter die Akzeptanz für Infrastrukturinvestitionen erhöht. |
| | Planung berücksichtigt Auswirkungen des Klimawandels | - die Folgen des Klimawandels und die Auswirkungen auf den Verkehrsträger besonders Berücksichtigung finden. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Schwächen**

- Welche **Schwächen** bringt das System in seiner heutigen Form in eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt mit?

Tabelle 34: Schwächen Binnenschifffahrt

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Ökonomische Faktoren | vergleichsweise geringes freies Ertragspotenzial | - der infrastrukturelle Ausbau eines potentiell ressourcenleichten Verkehrsträgers keine eigene Finanzierung finden kann. |
| | hoher Fixkostenanteil | - die Finanzierungsgrundlage für die Betreuung des gesamten Streckennetzes fehlt. Somit eine Fokussierung auf die wichtigen Hauptstrecken erfolgt. Dies gefährdet zukünftig Verlagerung und Ausbau auf Nebenstrecken. |
| | Kostendeckung im Binnenverkehr nicht gegeben | - der Verkehrsträger gefördert werden muss. |
| Technische Faktoren | geringe Flexibilität bestehender Komponenten | - kaum Optionen zum Rückbau von Wasserstraßen bestehen. |
| | sehr geringe Redundanzen | - bei Sperrungen z.B. aufgrund von großer Trockenheit oder Hochwasser kaum Alternativstrecken zur Verfügung stehen. |
| | Netzerweiterung unwahrscheinlich | - Wasserbau ist häufig mit großen Eingriffen in Landschaften und Ökosysteme verbunden.<br>- mehr Verlagerung auf die Binnenschifffahrt unwahrscheinlich ist. |
| | kein flächendeckendes Netz | - verhältnismäßig weites Netz schränkt Erhöhung des Verkehrsaufkommens ein. |
| | stärkere Abhängigkeit von Wettergegebenheiten mit Einfluss auf Wasserkreislauf, nur bedingt Pufferung möglich | - stärkere Anfälligkeit gegenüber dem Klimawandel als bei anderen Verkehrsträgern gegeben ist. Verliert perspektivisch an Attraktivität. |
| | Nutzung der Transportdienstleistung stark Standortabhängig | - verhältnismäßig weites Netz schränkt Erhöhung des Verkehrsaufkommens ein. |
| | langsame Transportgeschwindigkeiten | - Anforderungen an schnelle Lieferung von Waren und Halbfertigteilen just-in-time den Straßengüterverkehr begünstigt.<br>- ein Transport von hochwertigen Gütern aufgrund der hohen Kapitalbindung per Luftfracht oder dem Lkw erfolgt, sofern dies technisch realisiert werden kann. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Chancen**

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 35: Chancen Binnenschifffahrt

| Chancen | Begründung, Erläuterungen „Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| wichtige Rolle im Globalisierungsprozess | - Kopplung mit anderen Verkehrsträgern räumliche Flexibilität mit sich bringt und damit die Störanfälligkeit verringert (Seeschifffahrt).<br>- Potentiale für weitere Effizienzsteigerungen bestehen. |
| weiter zunehmender Verkehrsaufwand im Seeverkehr | - Internationale Seeschifffahrt vergleichsweise ressourcenleicht ist.<br>- Kapazitäten bestehen oder verhältnismäßig einfach geschaffen werden können. |
| zunehmende Sensibilität für externe Kosten | - Schifffahrt als vergleichsweise klimafreundliches Verkehrsmittel begünstigt wird.<br>- negative Umweltauswirkungen wie bspw. Luftschadstoffemissionen zunehmend stärker adressiert werden. |
| Trend zu mehr Nachhaltigkeit | - Innovationsgeschwindigkeit erhöht wird.<br>- Emissionen von Luftschadstoffen stärkere Beachtung finden.<br>- Weitere Maßnahmen denkbar sind (z.B.: Anpassung der Unterhaltung an das Verkehrssaufkommen, Einführung ökologisch nützlicher Stromregelungsbauwerke, moderne Steuerungssysteme, innovative Schiffstechniken, angepasste Schiffsgrößen) |
| Verknappung fossiler Rohstoffe - Preissteigerung fossiler Brennstoffe | - spezifischer Energieverbrauch im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern gering ausfällt.<br>- Potentiale zur Nutzung alternativer Energieträger bestehen.<br>- betriebliche Anpassungen zur Kostenminderung weitere Kraftstoffeinsparungen versprechen. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung das System in seiner heutigen Form hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 36: Risiken Binnenschifffahrt

| Risiken | Begründung, Erläuterungen<br>„Stellt ein Risiko dar, weil…“ |
|---|---|
| Klimawandel | - stärkere Belastung der Infrastruktur durch erhöhte Wahrscheinlichkeit von Wetterextremereignissen eintreten können.<br>- schwankende Wasserstände der Wasserstraßen die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der Gütertransportbedingungen gefährden.<br>- die Wasserstraßen weitere Funktionen wie Be- und Entwässerung erfüllen. |
| finanzielle Handlungsspielräume - finanzielle Lage der öffentlichen Hand | - notwendige Infrastrukturanpassungen gefährdet sind. Fokus stärker auf ökonomische Aspekte statt ökologische Aspekte von Infrastrukturmaßnahmen gerichtet wird. |
| Einführung zusätzlicher öffentlicher Abgaben / Gebühren / Steuern problematisch? | - die knappe Finanzierungslage sich voraussichtlich nicht ändern wird. |
| fehlende Investitionen in Nebenstrecken | - Wachstumspotentiale nicht erschlossen werden. |
| Beschleunigung des Güterverkehrs | - Schifffahrt verhältnismäßig langsam und großteilig ist.<br>- bei Störfällen (z.B. wetterbedingt) wenig Flexibilität in der Binnenschifffahrt besteht.<br>- schnelle Lieferung von Waren und Halbfertigteilen just-in-time den Straßengüterverkehr begünstigt. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

## 1.4 Informations- und Kommunikationstechnologien – SWOT Analyse der IKT-Infrastruktursysteme

### Stärken

- Welche **Stärken** weisen die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) auf, um eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichten und zukunftsfähigen Infrastruktur zu ermöglichen?

Tabelle 37: Stärken der IKT

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Dezentralisierung von Arbeitsstätten, Dienstleistung, Handel ist möglich | - Bei allgemeiner Verfügbarkeit von Informationsnetzen für Haushalte, Unternehmen und allen am Wirtschaftsleben beteiligten Akteuren kann Büroarbeit prinzipiell von jedem Standort aus erledigt werden, viele Dienstleistungen können ohne Ortsbezug erbracht werden und Käufer und Verkäufer können zusammen gebracht werden, ohne dass zentrale Einkaufsstätten erforderlich sind. Dadurch befördert die IKT eine Dezentralisierung. |
| | Arbeitserleichterung durch IKT (Künstliche Intelligenz, Produktionsprozesse, freies Wissen) | - Mit der Inanspruchnahme von Rechenleistung, Künstlicher Intelligenz, Computer gestützten Produktionstechniken und der schnellen und einfachen Verbreitung von Wissen trägt die IKT zur Arbeitserleichterung und Produktivitätssteigerung bei. |
| | Schaffung von Arbeitsplätzen und Zukunftsmärkten | - Die IKT-Branche ist eine stark wachsende Branche in der immer mehr Arbeitsplätze entstehen. Durch die Zunahme an IKT-Dienstleistungen und Handel mit IKT-Geräten entstehen zukunftsfähige Märkte. |
| | Einfluss der öffentlichen Hand ist (noch) gegeben (Wegerecht, Frequenzhoheit, Anteile an TELEKOM) | - Durch das Wegerecht, die Frequenzhoheit und Anteilen am Marktführer auf den deutschen Telekommunikationsmärkten (TELEKOM) hat die öffentliche Hand derzeit noch einen Einfluss auf die Versorgung mit Datendiensten und Unternehmensstrategie. |
| Ökonomische Faktoren | Betrieb von Netzen und Rechenzentren bietet wirtschaftliches Ertragspotenzial | - Telekommunikations-Infrastruktur wird derzeit wirtschaftlich und ohne öffentliche Zuschüsse betrieben. Sowohl die Bereitstellung von Kommunikationsanschlüssen als auch der Betrieb von Rechenzentren bieten ein erhebliches Ertragspotenzial, weshalb diese allein schon marktgetrieben ausgebaut werden. |
| | Wettbewerb unter IKT-Dienstleistern (wirkt Preis senkend) | - Die Bereitstellung von IKT-Dienstleistungen und Infrastrukturen erfolgt durch eine Vielzahl von Unternehmen. Die Europäische Gesetzbebung sorgt dabei für den Wettbewerb unter den Anbietern. Dies führt beispielsweise zu sinkenden Telefongebühren und günstigen Internetanschlüssen, da sich ein überteuertes Angebot nicht am Markt |

| | Stärken | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Stärke, weil…“ |
|---|---|---|
| | | etablieren kann. |
| | Ausschöpfung der Effizienzpotenziale in anderen Infrastrukturbereichen (Energie, Verkehr) | - IKT bietet viele Anknüpfungspunkte, um in anderen Infrastrukturbereichen Effizienzpotenziale auszuschöpfen, beispielsweise im Energiebereich durch die lastabhängige Steuerung von Erzeugungsanlagen, intelligente Stromnetze und verbrauchslenkende Messgeräte (SMART-Meter). Im Verkehrsbereich werden durch IKT optimierte Fahrzeuge, Routenführung und Auslastung von Strecken (Straßen oder Schienen) erreicht. |
| Technische Faktoren | hohe Potenziale für Energieeffizienz innerhalb des IKT-Systems | - Innerhalb des IKT-Systems, beispielsweise in Rechenzentren, besteht derzeit noch ein hohes Einsparpotenzial an Energieverbrauch. |
| | hohe Potenziale für Ressourceneffizienz innerhalb des IKT-Systems | - Ein hohes Potenzial zur Einsparung von Ressourcen besteht innerhalb des IKT-Systems durch die Miniaturisierung von IKT-Komponenten bei steigender Leistungsfähigkeit. Zukünftig werden bessere Verfahren entwickelt, um Ressourcen aus IKT-Komponenten zurück zu gewinnen und zu recyceln. |
| | schnelle Innovationszyklen (Weiterentwicklungspotenzial) | - Die technische Entwicklung von IKT-Geräten und Dienstleistungen ist sehr dynamisch. Dadurch entstehen schnelle Innovationszyklen, die es ermöglichen, Fehlentscheidungen schnell zu korrigieren und effizientere oder ressourcenschonendere Technologien schnell zu etablieren. |
| | hohe örtliche Flexibilität der Datendienste, variable Standorte der Rechenzentren | - IKT-Infrastrukturen sind ihrerseits ebenfalls sehr flexibel in ihrer örtlichen Präsenz (ausgenommen der Netze). So können Rechenzentren ohne Verlust an Funktionalität an solche Standorte verlagert werden, die für den Betreiber günstige Bedingungen bieten (z.B. geringe Grundstückskosten, qualifiziertes Personal, geringe Löhne, geringe Energiekosten, Standortsicherheit). |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Schwächen**

- Welche **Schwächen** stehen den Stärken der Informations- und Kommunikationstechnologien gegenüber, die eine Anpassung/Weiterentwicklung hin zu einer ressourcenleichten und zukunftsfähigen Infrastruktur behindern?

Tabelle 38: Schwächen der IKT

| | Schwächen | Begründung, Erläuterungen „Ist eine Schwäche, weil…“ |
|---|---|---|
| Institutionelle Faktoren | Netzanbindung entscheidet über wirtschaftliche Leistungsfähigkeit (bsp. ländliche Regionen) | - Die Abhängigkeit von Wirtschaftsstrukturen gegenüber zuverlässigen und schnellen Netzzugängen steigt zusehends. Dies führt dazu, dass beispielsweise in ländlichen Regionen oder Vororten ohne schnelle Internetanbindung Arbeitsplätze gefährdet sind und die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von Unternehmen stark eingeschränkt ist. |
| | Netze: hohe Investitionskosten | - Im Gegensatz zu Rechenzentren oder IKT-Geräten sind die technischen Lebensdauern von IKT-Netzen (Kupfer oder Glasfaser) sehr lang und deren Verlegung mit vergleichsweise hohen Investitionskosten verbunden. Die Flexibilität der Netzanbieter zum Ausbau oder Austausch dieser Infrastrukturen ist daher stark eingeschränkt. |
| | Rechenzentren: hohe Betriebskosten, hoher Energiebedarf | - Der Betrieb von Rechenzentren ist mit hohen laufenden Unterhaltskosten verbunden, was unter anderem auf deren hohen Energiebedarf zurückgeht. |
| Technische Faktoren | schnelle technische Alterung der Infrastrukturen, kurze Lebensdauern | - Informations- und Kommunikationstechnologien weisen, abgesehen von der oben genannten Netz-Infrastruktur, eine schnelle technische Alterung auf und müssen daher laufend erneuert werden. |
| | Rebound-Effekte machen Einsparungen zunichte | - Trotz steigender Effizienz von IKT-Geräten führt das rapide Wachstum an Datenübertragungs- und Datenverarbeitungsmengen dazu, dass der Energie- und Ressourcenverbrauch innerhalb dieses Infrastrukturbereiches weiter wächst. |
| | bei Business as usual: Steigende Ressourcen- und Energieverbräuche | - Zeichnet man die bisherige Entwicklung der IKT-Infrastruktur nach, so führt die IKT zu einer stetigen Mehrinanspruchnahme von Ressourcen und Energie. Eine Schwäche der IKT besteht daher darin, dass ein Ende dieser Entwicklung nicht absehbar und derzeit nicht planbar ist. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

### Chancen

- Welche **Chancen** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung des IKT-Systems hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 39: Chancen im Zusammenhang mit der IKT

| Chancen | Begründung, Erläuterungen „Bietet eine Chance, weil…“ |
|---|---|
| IKT-Infrastruktur ist auf der politischen Agenda | - Der Ausbau der IKT-Infrastruktur wird derzeit auf politischer Ebene vorangetrieben. Hinweise darauf sind der neuer Ressortzuschnitt des BMVI, die Breitbandstrategie der Bundesregierung, Digitale Agenda sowie Aktivitäten auf europäischer Ebene (Digital Agenda for Europe) |
| Gesellschaftlicher Wandel: Energiewende, Energieeinsparung | - Durch den aktuellen gesellschaftlichen Wandel hin zu mehr Energieeinsparung und Klimaschutz (Energiewende) können die technischen Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz durch den Einsatz von IKT besser ausgeschöpft werden. |
| gesellschaftlicher Wandel: Bewusstsein für Ressourcenknappheit | - Gleiches gilt für das steigende Bewusstsein für die Notwendigkeit zur langfristigen Sicherung der Rohstoffvorräte und zur verstärkten Einführung einer Kreislaufwirtschaft. |
| gesellschaftlicher Wandel: Digitalisierung aller Lebensbereiche (Smart-Homes, Verkehr, Smart-Grids, ...) | - Die Digitalisierung hat den Großteil der Gesellschaft erreicht. Durch die Nutzung von Smartphones, die hohe Ausstattung mit Computern und die Inanspruchnahme von vielfältigen Datendiensten schreitet die Digitalisierung aller Lebensbereiche fort und ermöglicht eine Nutzung der IKT zur Gebäudeautomation (z.B. Smart-Homes, die den Heizenergieverbrauch bei Abwesenheit der Bewohner senken), im Verkehr (z.B. Navigation) und bei der Energieversorgung (z.B. Smart-Grids). |
| technologischer Wandel, neue Werkstoffe, ressourcenschonende Digitaltechnologie | - Die technische Entwicklung im IKT-Bereich ist noch längst nicht abgeschlossen. Es werden neue Werkstoffe und neue Technologien entwickelt, die sich als energiesparender, leistungsfähiger und ressourcenschonender erweisen können. |
| breite gesellschaftliche Akzeptanz für IKT-Infrastruktur | - Anders als beispielsweise bei der Verkehrs- oder Energieversorgungsinfrastruktur besteht bei der IKT-Infrastruktur eine breite gesellschaftliche Akzeptanz. Die Verlegung von Breitbandkabeln oder das Errichten von Rechenzentren ist daher ohne gesellschaftlichen Widerstand realisierbar. Selbst gegenüber Mobilfunk-Infrastruktur gibt es trotz sichtbaren Antennen und möglicher Belastung mit elektromagnetischen Wellen eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

**Risiken**

- Welche **Risiken** lassen sich in aktuellen Trends und absehbaren Entwicklungen für eine Anpassung/Weiterentwicklung des IKT-Systems hin zu einer ressourcenleichteren Gestalt erkennen?

Tabelle 40: Risiken im Zusammenhang mit der IKT

| Risiken | Begründung, Erläuterungen „Stellt ein Risiko dar, weil….“ |
|---|---|
| Verknappung strategischer Rohstoffe (u.a. Konfliktmineralien), Abhängigkeit von Rohstoffmärkten | - Ein weiteres Risiko besteht darin, dass durch die steigende Nachfrage an IKT-Komponenten, bestimmte strategische Rohstoffe knapp werden. Es besteht bei einzelnen Rohstoffen eine starke Abhängigkeit zu wenigen Ländern und zur Preisentwicklung auf Rohstoffmärkten. |
| geringe finanzielle Handlungsspielräume der öffentlichen Hand | - Die IKT-Infrastruktur ist weitgehend privatwirtschaftlich organisiert. Die öffentliche Hand hat aufgrund fehlender Investitionsmittel und fehlender eigener IKT-Infrastruktur wenige Handlungsspielräume, die Infrastruktur in eine gewünschte Richtung weiter zu entwickeln. |
| Abhängigkeit von zuverlässiger Stromversorgung | - Das Funktionieren der IKT-Infrastruktur ist von einer zuverlässigen elektrischen Energieversorgung abhängig. Bei einem Stromausfall können die Infrastrukturen über unterbrechungsfreie Stromversorgungen und Stromgeneratoren nur kurzfristig (wenige Minuten bis zu wenigen Stunden) aufrechterhalten werden. Der wirtschaftliche Schaden sowie der Schaden für die Gesellschaft insgesamt, der durch einen längerfristigen Ausfall der IKT-Infrastruktur entstehen würde, wären beträchtlich. |
| Folgen des Klimawandels (steigende Temperaturen, Hochwasser, Niederschläge) | - Die IKT-Infrastruktur wird durch die Folgen des Klimawandels beeinträchtigt. So führen steigende Außentemperaturen zu einem erhöhten Klimatisierungsbedarf in Rechenzentren, Hochwasser kann Rechenzentren überschwemmen und ergänzend dazu starke Niederschläge die Funktion von Übertragungswegen stören. |
| Abhängigkeit von wenigen internationalen Konzernen | - Die wichtigsten Komponenten von IKT-Geräten (z.B. Prozessoren, Halbleiterspeicher, Festplatten, Li-Ionen-Akkus) werden nur von wenigen internationalen Konzernen hergestellt. Die Abhängigkeit zu diesen Konzernen ist sehr hoch. |
| wirtschaftliche, politische, gesellschaftliche Umbrüche (Finanzkrisen, Kriege, Bevölkerungswanderungen) | - Die IKT-Infrastruktur ist leicht verwundbar. Durch wirtschaftliche, politische und gesellschaftliche Umbrüche wie Finanzkrisen, Kriege oder Bevölkerungswanderungen kann das System leicht zerstört werden. |

Quelle: Difu/Öko-Institut.

# 2 Mengengerüste im Referenzszenario und den vier Fallstudien

## 2.1 Mengengerüst im Referenzszenario

Tabelle 41: Mengengerüst der Straßenverkehrsinfrastruktur im Referenzszenario

| Straßenverkehrs-infrastruktur | Ein-heit | Aktueller Wert | Bezugs-jahr | Quelle | Wert 2030 | Prozentuale Änderung | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Straßen | | | | | | | | | | |
| BAB | km | 12.932 | 2014 | Knappe et al. | 13.761 | 6% | Knappe et al. | 13.987 | 8% | Netzentwicklung im Verhältnis zum Anstieg der Verkehrsleistung |
| BAB Äste | km | 5.470 | 2014 | Knappe et al. | 5.821 | 6% | | 5.916 | 8% | |
| Bundesstraße | km | 41.481 | 2014 | Knappe et al. | 45.104 | 9% | | 45.842 | 11% | |
| Landesstraße | km | 87.325 | 2014 | Knappe et al. | 91.762 | 5% | | 93.265 | 7% | |
| Kreisstraße | km | 91.877 | 2014 | Knappe et al. | 96.545 | 5% | | 98.126 | 7% | |
| Gemeindestraße | km | 450.770 | 2014 | Knappe et al. | 473.672 | 5% | | 481.429 | 7% | |
| Brücken | m² | 31.487.106 | 2014 | Knappe et al. | 33.669.902 | 7% | | 34.859.975 | 11% | |
| Tunnel | m² | 3.122.306 | 2014 | Knappe et al. | 3.352.085 | 7% | | 3.487.247 | 12% | |
| Rast- und Autohöfe | | | | | | | | | | |
| versiegelte Fläche | m² | 30.078.269 | 2008 | Verkehrsrundschau 2008 | 32.006.375 | 6% | proportional zur Netzentwicklung | 32.530.549 | 8% | proportional zur Netzentwicklung |
| bebaute Fläche | m² | 379.443 | 2008 | Verkehrsrundschau 2008 | 403.766 | 6% | | 410.379 | 8% | |
| Straßenmeistereien | m² | 7.947.320 | 2006 | Joachim Lorenz: Handbuch Straßenbau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2006, ISBN 3-8167-7083-5, S. 269 und 270. | 8.395.234 | 6% | | 8.532.724 | 7% | |
| Tankstellen | Stück | 14.447 | 2009 | Verkehrsinvestitionsbericht | 12.227 | -15% | Kasten et al. 2015 | 9.658 | -33% | Kasten et al. 2015 |
| Werkstätten | m² | 7.660.000 | 2009 | DAT Report | 8.318.986 | 9% | über Fahrzeugbestand abgeleitet | 7.955.187 | 4% | über Fahrzeugbestand abgeleitet |
| Zubehör | | | | | | | | | | |
| Schutzplanken | km | 42.381 | 2008 | eigene Berechnung | 45.223 | 7% | proportional zur Netzentwicklung | 45.963 | 8% | proportional zur Netzentwicklung |
| Schilderbrücken | Stück | 30.742 | 2008 | eigene Berechnung | 32.837 | 7% | | 33.375 | 9% | |
| Leitpfosten | Stück | 21.228 | 2008 | eigene Berechnung | 22.782 | 7% | | 23.155 | 9% | |
| Verkehrszeichen | Stück | 4.674.748 | 2008 | eigene Berechnung | 4.946.008 | 6% | | 5.027.010 | 8% | |
| Leuchten | Stück | 10.020.239 | 2008 | eigene Berechnung | 10.532.708 | 5% | | 10.705.204 | 7% | |
| Lichtzeichenanlagen | Stück | 9.100.000 | 2008 | eigene Berechnung | 9.585.562 | 5% | | 9.742.547 | 7% | |

Tabelle 42: Mengengerüst der Schienenverkehrsinfrastruktur im Referenzszenario

| Schieneninfrastruktur | *Einheit* | *Aktuel-ler Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle* | *Wert 2030* | *Prozentua-le Ände-rung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentua-le Ände-rung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Gleise | | | | | | | | | | |
| eingleisig | km | 15.402 | 0 | DB-Netz Agentur 2008 | 15.915 | 3 % | Bergmann et al. 2015 | 15.915 | 3 % | konstant |
| zweigleisig | km | 22.829 | 2008 & 2012 | DB-Netz Agentur 2008, VDV 2012 | 24.304 | 6 % | | 24.304 | 6 % | |
| **Ingenieursbauwerke** | | | | | | | | | | |
| Brücken | km | 645 | 0 | DB-Netz Agentur 2008 | 670 | 4 % | Bergmann et al. 2015 | 670 | 4 % | konstant |
| Tunnel | km | 855 | 0 | DB-Netz Agentur 2008, VDV 2012 | 888 | 4 % | | 888 | 4 % | |
| **Gebäude** | | | | | | | | | | |
| Personenbahnhöfe | Stück | 5.395 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 5.395 | 0 % | konstant | 5.395 | 0 % | konstant |
| Güterbahnhöfe | Stück | 37 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 37 | 0 % | | 37 | 0 % | |
| Werke | Stück | 107 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 107 | 0 % | | 107 | 0 % | |
| **Energieversogrung** | | | | | | | | | | |
| Unterwerke | Stück | 183 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 200 | 9 % | Bergmann et al. 2015 | 200 | 9 % | konstant |
| Oberleitung | km | 52.451 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 57.391 | 9 % | | 57.391 | 9 % | |
| Tankstellen | Stück | 188 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 188 | 0 % | konstant | 188 | 0 % | |
| **Signal- und Komm.technik** | | | | | | | | | | |
| Kabeltrog | km | 32.070 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 33.737 | 5 % | proportional zur Gleisentwicklung | 33.737 | 5 % | proportional zur Gleisentwicklung |
| Kabel | km | 32.070 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 33.737 | 5 % | | 33.737 | 5 % | |
| LZB | km | 32.070 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 33.737 | 5 % | | 33.737 | 5 % | |
| Signale | km | 32.070 | 0 | Schmied, Mottschall 2010 | 33.737 | 5 % | | 33.737 | 5 % | |
| Stellwerke | Stück | 4.479 | 0 | Löchter 2009 | 4.712 | 5 % | | 4.712 | 5 % | |

Tabelle 43: Mengengerüst der Luftverkehrsinfrastruktur im Referenzszenario

| Luftverkehrsinfrastruktur | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Start- und Landebahn** | | | | | | | | | | |
| Beton | m² | 2.611.698 | 2012 | Auswertung http://www.airports.de/ | 3.109.805 | 19 % | proportional zur Verkehrsleistung | 3.644.934 | 40 % | proportional zur Verkehrsleistung |
| Asphalt | m² | 1.835.556 | 2012 | Auswertung http://www.airports.de/ | 2.185.636 | 19 % | | 2.561.736 | 40 % | |
| Asphalt / Beton | m² | 680.421 | 2012 | Auswertung http://www.airports.de/ | 810.192 | 19 % | | 949.608 | 40 % | |
| Asphalt | m² | 4.796.793 | 0 | Google Maps, Nachhaltigkeits-, Umwelt-berichte | 5.711.645 | 19 % | | 6.694.493 | 40 % | |
| **versiegelte Schultern** | m² | 2.051.070 | 0 | berechnet | 2.442.253 | 19 % | | 2.862.511 | 40 % | |
| **sonst. versiegelte Flächen** | m³ | 3.672.623 | 0 | Google Maps, Nachhaltigkeits-, Umwelt-berichte | 4.373.072 | 19 % | | 5.125.581 | 40 % | |
| **Gebäude** | | | | | | | | | | |
| Terminals | m³ | 933.737 | 0 | Google Maps, Nachhaltigkeits-, Umwelt-berichte | 1.111.821 | 19 % | proportional zur Verkehrsleistung | 1.303.141 | 40 % | proportional zur Verkehrsleistung |
| sonstige | m³ | 2.721.323 | 0 | Google Maps, Nachhaltigkeits-, Umwelt-berichte | 3.240.338 | 19 % | | 3.797.929 | 40 % | |

Tabelle 44: Mengengerüst der Schifffahrtsinfrastruktur im Referenzszenario

| Schifffahrts-infrastruktur | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Bauwerke** | | | | | | | | | | |
| Schleusen | Stück | 326 | 0 | WSV 2012 | 326 | 0 % | konstant | 326 | 0 % | konstant |
| Kanalbrücken | Stück | 10 | 0 | WSV 2012 | 10 | 0 % | | 10 | 0 % | |
| **Binnenhäfen** | | | | | | | | | | |
| Spundwandkai | km | 145 | 0 | MaRess | 145 | 0 % | konstant | 145 | 0 % | konstant |
| sonst. Ufer | km | 63 | 0 | MaRess | 63 | 0 % | | 63 | 0 % | |
| offene Lager | m² | 7.883.000 | 0 | MaRess | 7.883.000 | 0 % | | 7.883.000 | 0 % | |
| gedeckte Lager | m² | 3.603.000 | 0 | MaRess | 3.603.000 | 0 % | | 3.603.000 | 0 % | |
| **Seehäfen** | | | | | | | | | | |
| Spundwandkai | km | 119 | 0 | MaRess | 158 | 33 % | proportional zur Verkehrsleistung | 214 | 80 % | proportional zur Verkehrsleistung |
| sonst. Ufer | km | 206 | 0 | MaRess | 273 | 33 % | | 370 | 80 % | |
| offene Lager | m² | 7.119.000 | 0 | MaRess | 9.434.105 | 33 % | | 12.803.575 | 80 % | |
| gedeckte Lager | m² | 3.410.000 | 0 | MaRess | 4.518.935 | 33 % | | 6.132.910 | 80 % | |

Tabelle 45: Mengengerüst IKT Infrastruktur im Referenzszenario

| IKT-Infrastruktur | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Serverschrank | Stück | 30.500 | 2013 | Borderstep 2014 | 57.340 | 88 % | eigene Annahmen | 91.500 | 200 % | eigene Annahmen |
| Serverraum | Stück | 18.100 | 2013 | Borderstep 2014 | 34.028 | 88 % | | 54.300 | 200 % | |
| Kleines Rechenzentrum | Stück | 2.150 | 2013 | Borderstep 2014 | 4.042 | 88 % | | 6.450 | 200 % | |
| Mittleres Rechenzentrum | Stück | 280 | 2013 | Borderstep 2014 | 526 | 88 % | | 840 | 200 % | |
| Großes Rechenzentrum | Stück | 70 | 2013 | Borderstep 2014 | 132 | 88 % | | 210 | 200 % | |
| Gebäude Rechenzentren | m² | 910.500 | 2013 | berechnet | 1.711.740 | 88 % | | 2.731.500 | 200 % | |
| Mobilfunkstationen | Stück | 123.000 | 2011 | Uzun et al. 2012 | 150.060 | 22 % | | 184.500 | 50 % | |
| Kupferkabel | km | 1.480.000 | 2006 | Scharp 2011 | 1.805.600 | 22 % | | 2.220.000 | 50 % | |
| Glasfaserkabel | km | 206.300 | 2006 | Scharp 2011 | 750.932 | 264 % | | 1.444.100 | 600 % | |

Tabelle 46: Mengengerüst Kraftwerkspark im Referenzszenario

| Kraftwerkspark | Einheit | Aktueller Wert | Bezugs-jahr | Quelle und Herlei-tung | Wert 2030 | Prozentuale Veränderung | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Veränderung | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Kernkraftwerk (Siede-wasserreaktor)** | MW | 2.572 | 2014 | *BNetzA 2014* | 0 | - 100 % | Kernkraftwerke werden bis 2022 abgestellt (BGBl 2011) | 0 | - 100 % | Kernkraftwerke werden bis 2022 abgestellt (BGBl 2011) |
| **Kernkraftwerk (Druck-wasserreaktor)** | MW | 9.496 | 2014 | *BNetzA 2014* | 0 | - 100 % | - " - | 0 | - 100 % | - " - |
| **Steinkohlekraftwerk** | MW | 27.572 | 2014 | *BNetzA 2014* | 25.393 | -8 % | | 18.675 | -26 % | |
| **Braunkohlekraftwerk** | MW | 23.011 | 2014 | *BNetzA 2014* | 14.389 | -37 % | | 11.647 | -19 % | |
| **Ölkraftwerk** | MW | 5.916 | 2014 | *BNetzA 2014* | 462 | -92% | | 0 | -100 % | |
| **Gaskraftwerk** | MW | 28.625 | 2014 | *BNetzA 2014* | 20.906 | -27% | | 4.309 | -79 % | |
| **BHKW** | MW | 3.500 | 2010 | *Steger et al. 2011, S.161* | 3.500 | 0 % | | 3.500 | 0 % | |
| **KWK** | MW | 23.392 | 2010 | *Dena 2010, S. 17* | 23.392 | 0 % | | 23.392 | 0 % | |
| **Geothermiekraftwerk** | MW | 31 | 2014 | *BNetzA 2014* | 31 | 0 % | | 31 | 0 % | |
| **Laufwasserkraftwerk** | MW | 3.978 | 2014 | *BNetzA 2014* | 5.492 | 38 % | | 5.769 | 5 % | |
| **Wasserkraftwerk (Speicher)** | MW | 1.393 | 2014 | *BNetzA 2014* | 1.393 | 0 % | | 1.393 | 0 % | |
| **Windkraftanlage** | | | | | | | | | | |
| **Offshore** | MW | 3.080 | 2014 | *BNetzA 2014* | 15.000 | 487 % | | 23.500 | 156 % | |
| **Onshore** | MW | 26.862 | 2014 | *BNetzA 2014* | 70.067 | 260 % | | 80.067 | 114 % | |
| **Biogasanlage** | MW | 6.325 | 2014 | *BNetzA 2014* | 2.389 | -62 % | | 912 | -62 % | |
| **Photovoltaikanlage (öffentlich)** | MW | 36.858 | 2014 | *BNetzA 2014* | 61.675 | 67 % | | 62.338 | 1 % | |
| **Photovoltaikanlage (privat)** | MW | 35.700 | 2014 | *BSW-Solar 2014, S. 1* | - | - | - | - | - | - |
| **Solarthermieanlage (privat)** | MW | 12.300 | 2014 | *BSW-Solar 2014, S. 1* | 12.300 | 0 % | | 12.300 | 0 % | |
| **Abfall-verbrennungsanlage** | MW | 1.667 | 2014 | *BNetzA 2014* | 1.691 | 1 % | | 1.691 | 0 % | |
| **Pumpspeicher-kraftwerk** | MW | 6.776 | 2014 | *BNetzA 2014* | 9.258 | 37 % | | 9.258 | 0 % | |
| **Fernwärme-Anschlusswert** | MW | 50.502 | 2012 | *AGFW 2013, S. 11* | 50.502 | 0 % | | 50.502 | 0 % | |
| **Brennwertkessel** | Stück | 4.100.000 | 2013 | *HWWI 2013, S. 2* | 4.100.00 | 0 % | | 4.100.000 | 0 % | |

Tabelle 47: Mengengerüst Stromnetz im Referenzszenario

| Stromnetze | Einheit | Aktueller Wert | Bezugs-jahr | Quelle und Herleitung | Wert 2030 | Prozentuale Änderung | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Freileitungen** | | | | | | | | | | |
| **Höchstspannung (380/220 kV)** | km | 34.697 | 2012 | *Statista 2015,* Verteilung nach *Steger et al. 2011, S. 123* | 37.805 | 9 % | Ausbauplan *NEP Strom 2014, S. 84 ff.,* Verteilung nach *Steger* et al. 2011, S. 123. Die Annahme ist ein Zubau von 11.100 km Hoch/Höchstspannung, 72.100 km Mittelspannung und 51.600 km Niederspannung bis 2030 jeweils gleichverteilt auf die bestehenden Frei- und Erdleitungen (nach NEP Strom 2014, S. 76 – Szenario B). | 41.259 | 19 % | lineare Fortschreibung des Netzausbaus bis 2030 für die Prognose 2050, selbe Verteilung |
| **Hochspannung (110 kV)** | km | 88.846 | 2012 | - " - | 96.309 | 8 % | - " - | 104.602 | 18 % | - " - |
| **Mittelspannung (10/20/30 kV)** | km | 165.197 | 2012 | *Statista 2015a* | 187.548 | 14 % | - " - | 212.383 | 29 % | - " - |
| **Niederspannung (0,4 kV)** | km | 248.272 | 2012 | - " - | 258.592 | 4 % | - " - | 270.059 | 9 % | - " - |
| **Erdkabel** | | | | | | | | | | |
| **Höchstspannung (380/220 kV)** | km | 100 | 2008 | *Steger et al. 2011, S. 123* | 109 | 9 % | Prognosedaten aus Freileitungen, Verteilung nach *Steger et al. 2011, S. 123* | 119 | 19 % | Prognosedaten aus Freileitungen, Verteilung nach *Steger et al. 2011, S. 123* |
| **Hochspannung (110 kV)** | km | 6.176 | 2008 | - " - | 6.695 | 8 % | - " - | 7.272 | 18 % | - " - |
| **Mittelspannung (10/20/30 kV)** | km | 367.697 | 2012 | - " - | 417.446 | 14 % | - " - | 472.723 | 28 % | - " - |
| **Niederspannung (0,4 kV)** | km | 993.089 | 2012 | - " - | 1.034.369 | 4 % | - " - | 1.080.235 | 9 % | - " - |
| **Umspannwerke** | | | | | | | | | | |
| **Transformatoren NS-Netz** | Stück | 557.700 | 2008 | *Steger et al. 2011, S. 128* | 577.220 | 3 % | Steigerung proportional zum Trassenausbau | 598.908 | 7 % | Steigerung proportional zum Trassenausbau |
| **Transformatoren MS-Netz 2,5 - 50 MVA** | Stück | 7.500 | 2008 | - " - | 8.370 | 12 % | - " - | 9.337 | 24 % | - " - |
| **Transformatoren** | | | | | | | | | | |
| **MS-Netz >50 MVA** | Stück | 1.100 | 2008 | - " - | 1.192 | 8 % | - " - | 1.295 | 18 % | - " - |

| Stromnetze | Einheit | Aktueller Wert | Bezugs-jahr | Quelle und Herleitung | Wert 2030 | Prozentuale Änderung | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Stromzähler** | | | | | | | | | | |
| **Normal** | Stück | 40.860.000 | 2013 | Summe von *Statista 2015b*, Verteilung nach Roll-out-Szenario *Ernst & Young 2013, S. 174* | 20.000.000 | - 51 % | *Ernst & Young 2013, S. 165 ff.* | 0 | -100 % | Annahme des Komplettersatzes Alter Stromzähler aufgrund ihrer Lebensdauer; Ernst & Young 2013, S. 174. |
| **Smart Meter** | Stück | 4.540.000 | 2013 | - " - | 25.000.000 | 451 % | - " - | 50.300.000 | 1008 % | - " - |

Tabelle 48: Mengengerüst Gasnetz im Referenzszenario

| Gasnetze | Einheit | Aktuel-ler Wert | Bezugs-jahr | Quelle und Herleitung | Wert 2030 | Prozentuale Änderung | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Regional- und Ortsnetze** | | | | | | | | | | |
| **Niederdrucknetz (<=100 mbar)** | km | 157.300 | 2012 | *BNetzA 2012, S. 173, aufaddierte Werte der Tabelle 39* | 173.030 | 10% | Eine Annäherung der gesamten Gasnetzlänge an die gesamte Abwassernetzlänge wird prognostiziert, da dieses einen Versorgungsgrad von 99 % erreicht. So wird auch hier von einer vollen Erschließung ausgegangen. Diese Entwicklung wurde ursprünglich für den Zeitraum von 2000 bis 2012 prognostiziert, zeigt sich nun aber eher realistisch bis 2030. Bei einer Gleichverteilung der Entwicklung auf die unterschiedlichen Gasnetz e zur Annäherung an die Gesamtlänge des Abwassernetzes ergibt sich ein Wert von jeweils 10 %. Eine ungefähr gleichschrittige Entwicklung der Netze weist auch *Statista 2015c* aus. | 190.333 | 21% | Annahme einer Steigerung der Länge um 10 % seit 2030, da ein Rückgang der Nachfrage besteht (benötigte Raumwärme für Haushalte, Verdichtung) |
| **Mitteldrucknetz (101-1000 mbar)** | km | 224.880 | 2012 | - " - | 247.368 | 10% | - " -<br>Gleicher Prozentsatz wie das Niederdrucknetz, da gleicher Anstieg von 2000 bis 2012 (*Statista 2015c*) | 254.789 | 13% | Annahme einer Steigerung der Länge um 3 % seit 2030 |
| **Hochdrucknetz (>1000mbar)** | km | 128.528 | 2012 | - " - | 141.381 | 10% | - " - | 169.657 | 32% | Annahme einer Steigerung der Länge um 20 % seit 2030 |
| **Gasfernleitungs-netze** | | | | | | | | | | |
| **Klasse A >1000mm** | km | 5.236 | 2012 | Gesamtanstieg aus *BNetzA* | 5.257 | 0 % | Maßnahmen bis 2025 in *FNB Gas 2014*, Daten bis 2030 extrapoliert; | 5.257 | 0% | Kein weiterer Ausbau in den Gasfernleitungen prognostiziert, da der Gasver- |

| Gasnetze | *Einheit* | *Aktuel-ler Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle und Herleitung* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | *2013, S.187.* nach Klassen durch *Steger et al. 2011, S.137* | | | bei den Klassen A und B wird von einer langen Vorlaufzeit ausgegangen und somit die Ausweisungen nach BNetzA genutzt. Ab Klasse C wird der Verteilschlüssel nach Steger et al. 2011, S. 137 berücksichtigt. | | | brauch sich selbst mit den aktuellen Maßnahmen reduziert (UBA 2014: 223), |
| **Klasse B 700 - 1000mm** | km | 6.992 | 2012 | - " - | 7.570 | 8% | - " - | 7.570 | 8% | - " - |
| **Klasse C 500 - 700mm** | km | 8.229 | 2012 | - " - | 8.399 | 2% | - " - | 8.399 | 2% | - " - |
| **Klasse D 350 - 500mm** | km | 4.851 | 2012 | - " - | 4.952 | 2% | - " - | 4.952 | 2 % | - " - |
| **Klasse E 225 - 350mm** | km | 6.133 | 2012 | - " - | 6.260 | 2% | - " - | 6.260 | 2% | - " - |
| **Klasse F 110 - 225mm** | km | 5.394 | 2012 | - " - | 5.506 | 2% | - " - | 5.506 | 2% | - " - |
| **Klasse G <110mm** | km | 859 | 2012 | - " - | 877 | 2% | - " - | 877 | 2% | - " - |
| **Gasspeicher** | | | | | | | | | | |
| **oberirdisch** | Stück | 47 | 2014 | *Frühschütz 2014* | 51 | 10% | Durch den Bedarf an Gasspeichern aber den präferierten Ausbau an unterirdischen Speicher 10 % Wachstum angenommen | 51 | 10 % | Andere Speichermöglichkeiten werden genutzt |
| **unterirdisch** | Stück | 51 | 2014 | *BMWI 2014* | 75 | 47% | *Deutscher Bundestag 2013, S. 5 f.*, zusätzlich 20 % weiterer Ausbau zu den geplanten Maßnahmen durch Speicherbedarf aber begrenzten unterirdischen Speichermöglichkeiten | 75 | 47 % | - " - |
| **Gasverdichter** | Stück | 71 | 2014 | *FNB Gas 2014, S. 3 ff.* | 83 | 19% | Bis 2023 sind 10 Anlagen in Planung laut *FNB Gas 2013, S. 60*, bis 2030 wird der Anstieg durch das geringere Wachstum im Erdgasnetzausbau abnehmen, sodass noch die Hälfte des aktuellen Wachstum hinzukommen | 83 | 19 % | Gasfernleitungen werden nicht weiter ausgebaut |

Tabelle 49: Mengengerüst Wärmenetz im Referenzszenario

| Wärmenetze | Einheit | Aktueller Wert | Bezugs-jahr | Quelle und Herleitung | Wert 2030 | Prozentuale Änderung | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Wärmenetze** | | | | | | | | | | |
| **(Fern)Wärmenetz Wasser** | km | 19.026 | 2012 | *AGFW 2013, S. 29* | 20.826 | 9 % | Das Netz ist größtenteils ausgebaut und der Raumwärmebedarf nimmt ab, dennoch gibt es derzeit Tendenzen zum weiteren Ausbau, nach *UBA 2007, S. 20* 100 km pro Jahr. Der Fernwärmeabsatz wird bis 2050 steigen, wobei der Netzausbau bis 2030 weitestgehend abgeschlossen sein wird. | 21.000 | 10 % | Nur noch lokal vereinzelter Ausbau, Stabilisierung der Länge durch Rückgang des Raumwärmebedarfs |
| **Wärmenetz Dampf** | km | 624 | 2012 | *AGFW 2013, S. 31* | 300 | - 52 % | Ein Umstieg vom ineffizienten Medium Dampf zu Wasser wird eingeschlagen (BET Aachen 2013, S. 96), Umrüstung der Hälfte der Anlagen angenommen | 100 | - 84 % | Bis 2050 sollte nahezu das gesamte Wasserdampfnetz umgerüstet sein |
| **Nahwärmenetz** | km | 75.000 | 2007 | *Steger et al. 2011: 149* | 100.000 | 33 % | Ein Ausbau von 50.000 km bis 2020 wird prognostiziert nach *UBA 2007, S. 155 f.*, doch dieser Wert ist durch den Transformationsprozess erst bis 2050 realistisch | 125.000 | 66 % | Kompletter Ausbau der prognostizierten 50.000 km |
| **Haushaltsübergabestationen** | Stück | 330.408 | 2012 | *AGFW 2013, S. 29 (inklusiver der Dampfübergabestationen)* | 395.217 | 20 % | Übergabestationen nehmen zu bei gleichbleibender Trassenlänge durch Raumwärmeeinsparungen nach *UBA 2007, S. 20 f.*; zusätzlich Trassenausbau geplant, daher wird ein Zuwachs der gesamten Anschlüsse von 1 % jährlich angenommen | 434.739 | 32 % | Zwar stagniert der Ausbau von Fernwärmeleitungen, doch Nahwärmenetze werden weiter ausgebaut und bestehende Netze verdichtet. Somit gibt es 10 % mehr Übergabestationen gegenüber 2030 |
| **Kältenetze** | | | | | | | | | | |
| **Kältenetze** | km | 55 | 2012 | *AGFW 2013, S. 34* | 110 | 100 % | Durch Klimawandel und neue Techniken wird ein Ausbau angenommen, der jedoch von der technischen Entwicklung abhängt, daher wird eine Verdopplung angenommen | 200 | 264 % | Durch die Kopplung von KWK-Wärmenetze mit Kälteabsorptions-an-lagen ergeben sich weitere Chancen, daher weiter nahezu Verdopplung |
| **Kälteübergabestationen** | Stück | 309 | 2012 | *AGFW 2013, S. 34* | 618 | 100 % | Mit dem Netz verdoppeln sich die Übergabestationen | 1236 | 300 % | Zunahme wie im Kältenetz bei Steigerung der Haushaltsanschlüsse für das Netz |
| **Fernwärmeanlagen** | | | | | | | | | | |
| **Fernwärme-anlagen mit KWK** | Stück | 916 | 2012 | *AGFW 2013, S. 17* | 1.727 | 89 % | Aus den AGFW-Berichten der letzten Jahre ist ein steter Anstieg der KWK-Anlagen um 5 % pro Jahr zu entnehmen, der bis 2025 anhält. Dann stagniert der Ausbau von KWK-Anlagen (vgl. *UBA 2007*) | 1.727 | 89 % | Kein weiterer Ausbau der Fernwärme. |

| Wärmenetze | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle und Herleitung* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fernwärme-anlagen ohne KWK (Heiz-werke)** | Stück | 2.157 | 2012 | *AGFW 2013, S. 17* | 3.187 | 48 % | Ähnliche Entwicklung wie bei Fernwär-meanlagen mit KWK, Wachstum hier nur bis 2020, da Anlagen mit KWK dominie-ren werden | 3.187 | 48 % | - " - |

Tabelle 50: Mengengerüst Wasserversorgung im Referenzszenario

| Wasserversorgung | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle und Herleitung* | *Wert 2030* | *Prozentuale Verände-rung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Verände-rung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Brunnen** | | | | | | | | | | |
| **Vertikalbrunnen** | Stück | 88.972 | 2004 | *Statistisches Bundesamt 2004, S. 17: 48 % aller Wassergewinnungsanlagen sind Vertikalbrunnen (von insgesamt 185.358 Trinkwassergewinnungsanlagen in Deutschland)* | 81.854 | -8 % | Kopplung des Wasserverbrauchs mit der Anzahl an Brunnen, prognostiziert wird ein weiterer Wasserverbrauchsrückgang um 8 % bis 2030 nach *Hamburg Wasser 2008,* Verteilung auf Brunnenarten wie aktueller Wert | 80.000 | -10 % | Weiterhin leichter Rückgang des Wasserverbrauchs angenommen, da Brunnen auch bei Wasserverbrauchs-rückgang als Sicherheitsreserve vorgehalten werden |
| **Horizontalbrunnen** | Stück | 3.707 | 2004 | - " -<br>2 % aller Brunnen | 3.411 | -8 % | - " - | 3.400 | -8 % | Leichter Rückgang und Stabilisierung der Zahl, da auch Bevölkerungsprognosen nicht konsistent sind |
| **Quellwasserfassungen** | Stück | 92.679 | 2004 | - " -<br>50 % aller Wassergewinnungsanlagen sind Quellen – exemplarisch siehe BLU 2013 | 85.265 | -8 % | - " - | 85.265 | -8 % | - " - |
| **Talsperren** | Stück | 311 | 2003 | *Steger et al. 2011, S. 68* | 302 | -3 % | Durch den Bedarf an Erneuerungsmaßnahmen wird das Fortbestehen einzelner Talsperren ggf. in Frage gestellt. Dies gilt für Talsperren, die der Wasserversorgung dienen. Die absolute Zahl an Talsperren wird im | 300 | -4 % | Weiterer, minimaler Rückgang anzunehmen, aber nahezu Stabilisierung des Wertes |

| Wasserversorgung | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle und Herleitung* | *Wert 2030* | *Prozentuale Verände-rung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Verände-rung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Zuge der Klimaanpassung (insbesondere zur Hochwasserregulierung und Energieerzeugung) zunehmen; daher hier jedoch die Annahme von 3 % Rückgang bei Talsperren, die der Wasserversorgung dienen, vgl. *Steger et al. 2011, S. 71* | | | |
| **Wasserwerke** | Stück | 6.200 | 2011 | *UBA 2014, S. 2* | 5.828 | -6 % | Der Rückgang ist an die Reduzierung des Wasserverbrauchs als auch an die Zentralisierung der Wasserversorgung gebunden, der Rückgang um 8 % wird um ein Viertel gesenkt, da bereits Effizienzmaßnahmen getroffen wurden | 5.478 | -12 % | Wasserabgabe sinkt weiter und Konzentration der Anlagen erfolgt extensiv |
| **Trinkwasserspeicher** | Stück | 9.800 | 2009 | *Steger et al. 2011, S. 86; aufaddierte Werte der Tabelle 70* | 9.408 | -4 % | Es werden 8 % Rückgang an Trinkwasserbedarf angenommen, doch durch Ausweitung Siedlungs- und Verkehrsfläche wird dieser Rückgang um 4% reduziert | 9.032 | -8 % | Lineare Fortschreibung des Rückgangs an Trinkwasserspeicher durch die gleichen Gründe sowie unsicheren Bevölkerungsprognosen |
| **Rohrleitungskilometer** | km | 530.000 | 2011 | *BMU 2013, S. 2*, Verteilung nach *Steger et al. 2011, S. 78* | 583.000 | 10 % | Durch sehr hohen Versorgungsgrad kein Ausbau, nur Erweiterung der Siedlungs- und Verkehrsfläche und Nachverdichtung verursacht Neubau, sodass 10 % bis 2030 angenommen werden (vgl. *Wegener, T. & F. Rüffer 2014*) | 604.200 | 14 % | Bei Einhaltung des 30 ha-Ziel für 2020 sinkt das Wachstum der Siedlungs- und Verkehrsfläche und dementsprechend auch die Versorgungsrohre mit Trinkwasser |

Tabelle 51: Mengengerüst Abwasserentsorgung im Referenzszenario

| Abwasserentsorgung | *Einheit* | *Aktueller Wert* | *Bezugs-jahr* | *Quelle und Herleitung* | *Wert 2030* | *Prozentuale Veränderung* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Veränderung* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Kanalnetz öffentlich** | | | | | | | | | | |
| **Regenwasser** | km | 120.937 | 2010 | *Statistisches Bundesamt 2010, S. 16* | 145.124 | 20 % | Laut BDEW erweiterte sich das Kanalnetz zur Regenwasserbeförderung von 2010 auf 2013 um 4,5 Prozent; zusätzlich wird das Trennkanalsystem durch § 55 Abs. 2 Wasserhaushaltsgesetz befördert, sodass Neubauflächen vor allem dieses System anwenden werden | 159.637 | 32 % | Der weitere Siedlungsausbau wird mit Trennkanalsystemen abgefangen, das veränderte Niederschlagsregime fördert den weiteren Trennkanalausbau, doch eine Sättigung aufgrund wirtschaftlicher Belange setzt ein, sodass eine Steigerung des Wertes von 2030 um 10 % angenommen wird |
| **Schmutzwasser** | km | 199.631 | 2010 | - " - | 239.557 | 20 % | - " - | 253.931 | 27 % | Durch den reduzierten Siedlungs- und Verkehrsflächenwachstum sinkt das Wachstum der Schmutzwasserkanäle auf 6 % zu 2030, da auch Mischwasserkanäle diese Funktion übernehmen können und somit nur Regenwasserleitungen gebaut werden müssen |
| **Mischwasser** | km | 241.013 | 2010 | - " - | 240.000 | 0 % | Vorzugsweise Trennkanalsysteme werden entwickelt, daher stagniert die Anzahl an Mischwasserkanälen durch teilweisen Rückbau aber auch teilweisen Neubau, wenn Trennkanalsystem unrentabel sind | 240.000 | 0 % | Vorzugsweise Trennkanalsysteme werden entwickelt, daher stagniert die Anzahl an Mischwasserkanälen durch teilweisen Rückbau aber auch teilweisen Neubau, wenn Trennkanalsystem unrentabel sind |
| **Regenentlastungsanlagen** | Stück | 47.678 | 2010 | - " - | 56.260 | 18 % | Wie bei den Trennkanälen wird ein Ausbau von 20 % angenommen, jedoch muss der Rückgang von Schmutzwasser beachtet werden, sodass eine geringere Entwicklung resultiert | 61.886 | 30 % | Ebenfalls Steigerung um 10 % zu 2030 durch Starkregenereignisse infolge des Klimawandels |
| **Regenüberlaufbecken, Regenrückhaltebecken und Regenklärbecken** | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Regenüberlauf ohne Becken** | Stück | 21.099 | 2010 | - " - | 20.000 | -5 % | Ein leichter Rückbau wird aufgrund der Bevorzugung von Regenüberlaufbecken angenommen, der durch weitere Siedlungsflächenerschließung weiter reduziert wird | 20.000 | -5 % | Stagnation der Entwicklung, da durch Starkregenereignisse die Infrastruktur erhalten bleibt |
| **Kanalnetz private Grundstücke** | km | 1.000.000 | 2012 | *UBA 2015 , S. 66*, nach *Bosseler/Beck 2012, S. 2* | 1.100.000 | 10 % | Die privaten Kanalnetze steigen proportional zur Siedlungsflächenzunahme und steigen somit um 10 % | 1.155.000 | 16 % | Zwar sinkt die Zahl der Haushalte nach 2030, doch nimmt die Siedlungsfläche weiter zu, sodass ein verringertes Wachstum von 5 % ab 2030 angenommen wurde |
| **Schächte im Kanalnetz** | Stück | 13.428.146 | 2009 | *DWA 2009, S. 4* | 14.936.965 | 11 % | Pro km öffentliches Kanalnetz gibt es ca. 24 Schächte, dies wird auf die Annahme zum Kanalnetz im Jahr 2030 hochgerechnet | 15.627.664 | 16 % | Pro km Kanalnetz gibt es ca. 24 Schächte, dies wird auf die Annahme zum Kanalnetz im Jahr 2050 hochgerechnet |
| **Abwasserbehandlungsanlagen industrielle** | Stück | 2.953 | 2010 | *Statistisches Bundesamt 2013, S. 17* | 2.894 | -2 % | Die Entwicklung wird ähnlich den Wasserwerken Stufe II zugeordnet, da viele Kleinanlagen vorhanden sind aber die Wirtschaft weiter steigt | 2.836 | -4 % | Konstant abnehmende Entwicklung im Bestand industrieller Abwasserbehandlungsanlagen |
| **I < 1000 EW** | Stück | 4.198 | 2010 | *Statistisches Bundesamt 2013, S. 17*, Verteilung nach *Steger et al. 2011, S. 111* | 4.114 | -2 % | Abwasserbehandlungsanlagen werden derzeit bereits konstant zurückgebaut, dabei vor allem bei Kleinanlagen, da die Großstädte ihre Anlagen weiter benötigen, durch technische Verbesserungen (Effizienz, Reinigungsleistung, Kosten) werden aber Kleinanlagen größtenteils weiter betrieben (vgl. Berichte des Statistischen Bundesamtes zur Öffentlichen Abwasserbehandlung und-entsorgung; hier ist ein steter Rückgang zu verzeichnen) | 3.867 | -8 % | Weitere Einsparmaßnahmen und Zentralisierungstendenzen lassen einen allgemeinen Rückgang von 6 % |
| **II 1.000-5.000 EW** | Stück | 2.428 | 2010 | - " - | 2.379 | -2 % | - " - | 2.236 | -8 % | - " - |
| **III 5.000-10.000 EW** | Stück | 841 | 2010 | - " - | 807 | -4 % | Leicht erhöhter Rückgang zu den kleineren Anlagen durch Siedlungsstrukturauflösungen | 759 | -10 % | - " - |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **IV 10.000-100.000 EW** | Stück | 1.921 | 2010 | - ” - | 1.921 | 0 % | Großstädte und ihre Infrastrukturen bleiben bestehen, daher werden auch ihre Abwasserbehandlungsanlagen konstant bleiben | 1.806 | -6 % | - ” - |
| **V >100.000 EW** | Stück | 244 | 2010 | - ” - | 244 | 0 % | - ” - | 244 | 0 % | Großstädte und ihre Infrastrukturen bleiben bestehen, daher werden auch ihre Abwasserbehandlungsanlagen konstant bleiben |

## 2.2 Mengengerüst Fallstudie „gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur“

Tabelle 52: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Gekoppelte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur“

| | *Einheit* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Energie**<br>Steinkohlekraftwerk | MW | 25.364 | 0 % | geringerer Wärmebedarf + BHKWs auf Kläranlagen | 18.581 | -1 % | geringerer Wärmebedarf + BHKWs auf Kläranlagen |
| Braunkohlekraftwerk | MW | 13.837 | -4 % | | 6.865 | -41 % | |
| BHKW | MW | 4.000 | 14 % | | 4.500 | 29 % | |
| PtX-Erzeugungsanlagen | PJ/a | 67,2 | - | PtX-Erzeugung als Flexibilitätsoption, Einspeisung PtG in vorhandene Netze | 201,6 | - | PtX-Erzeugung als Flexibilitätsoption, Einspeisung PtG in vorhandene Netze |
| **IKT**<br>Großes Rechenzentrum | Stück | 178 | 35 % | zusätzlicher Steuerungsbedarf | 315 | 50 % | zusätzlicher Steuerungsbedarf |
| Gebäude Rechenzentren | m² | 1.952.112 | 14 % | | 3.277.800 | 20 % | |

## 2.3 Mengengerüst Fallstudie „Kopplung Verkehr - Energie“

Tabelle 53: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kopplung Verkehr - Energie“; Energieversorgungsinfrastruktur

| Energieversorgungsinfrastruktur | *Einheit* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Windkraftanlage (Offshore) | MW | 15.000 | 0% | Deckung des Zusätzlichen Strombedarfs mit EE | 31.312 | 33% | Deckung des Zusätzlichen Strombedarfs mit EE |
| Windkraftanlage (Onshore) | MW | 70.067 | 0% | | 106.684 | 33% | |
| Photovoltaik | MW | 61.675 | 0% | | 83.061 | 33% | |
| Solarthermieanlage auf Dach | MW | 12.300 | 0% | | 12.300 | 0% | |
| Höchstspannung (380/220 kV) | km | 37.805 | 0% | Netzausbau proportional zu steigendem Strombedarf | 48.722 | 18% | Netzausbau proportional zu steigendem Strombedarf |
| Hochstpannung (110 kV) | km | 96.309 | 0% | | 123.522 | 18% | |
| Mittelspannung (10/20/30 kV) | km | 187.548 | 0% | | 250.797 | 18% | |
| Niederspannung (0,4 kV) | km | 258.592 | 0% | | 318.906 | 18% | |
| Erdungsleiter Hochstspannung | km | 59.927 | 0% | | 77.232 | 18% | |
| Freileitungen Hochspannung | km | 845.526 | 0% | | 1.084.436 | 18% | |
| Freileitungen Mittelspannung | km | 527.212 | 0% | | 705.011 | 18% | |
| Freileitungen Niederspannung | km | 924.960 | 0% | | 1.140.696 | 18% | |
| Höchstspannung (380/220 kV) | km | 109 | 0% | | 119 | 0% | |
| Hochstpannung (110 kV) | km | 6.695 | 0% | | 7.272 | 0% | |
| Mittelspannung (10/20/30 kV) | km | 417.446 | 0% | | 472.723 | 0% | |
| Niederspannung (0,4 kV) | km | 1.034.369 | 0% | | 1.080.235 | 0% | |
| Transformatoren NS-Netz | 0 | 577.220 | 0% | | 695.694 | 16% | |
| Transformatoren MS-Netz 2,5 - 50 MVA | 0 | 8.370 | 0% | | 9.356 | 0% | |
| Transformatoren MS-Netz >50 MVA | 0 | 1.192 | 0% | | 1.372 | 6% | |

Tabelle 54: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kopplung Verkehr - Energie“; Verkehrsinfrastruktur

| Verkehrsinfrastruktur | *Einheit* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Ladeinfrastruktur** | | | | | | | |
| Heim | Stück | 8.818.087 | 11446% | nach Kasten et al. 2015 | 30.458.398 | 4880% | nach Kasten et al. 2015 |
| Öffentlich | Stück | 179.628 | 1350% | | 1.425.244 | 11222% | |
| **Oberleitungen BAB** | km | 1.800 | neu | ENUBA 2 | 4.000 | neu | ENUBA 2 |

## 2.4 Mengengerüst Fallstudie „Innovationen im Verkehr“

Tabelle 55: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Straßenverkehrsinfrastruktur

| Straßenverkehrsinfrastruktur | Einheit | Wert 2030 | Prozentuale Änderung ggü Referenz | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung ggü Referenz | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Straßen**<br>BAB | km | 13.761 | 0% | Knappe et al. | 13.761 | -2% | konstant |
| BAB Äste | km | 5.821 | 0% | | 5.821 | -2% | |
| Bundesstraße | km | 45.104 | 0% | | 45.104 | -2% | |
| Landesstraße | km | 91.762 | 0% | | 91.762 | -2% | |
| Kreisstraße | km | 96.545 | 0% | | 96.545 | -2% | |
| Gemeindestraße | km | 467.709 | -1% | Reduktion der Parkflächen nach Fahrzeugbestand | 463.763 | -4% | Reduktion der Parkflächen nach Fahrzeugbestand |
| **Brücken** | m² | 33.669.902 | 0% | Knappe et al. | 33.669.902 | -3% | Knappe et al. |
| **Tunnel** | m² | 3.352.085 | 0% | | 3.352.085 | -4% | |
| **Rast- und Autohöfe**<br>versiegelte Fläche | m² | 32.006.375 | 0% | proportional zur Netzentwicklung | 32.006.375 | -2% | proportional zur Netzentwicklung |
| bebaute Fläche | m² | 403.766 | 0% | | 403.766 | -2% | |
| **Straßenmeistereien**<br>BAB | m² | 2.525.285 | 0% | | 2.525.285 | -2% | |
| sonstige | m² | 5.820.445 | -1% | | 5.787.684 | -3% | |
| **Zubehör**<br>Schutzplanken 2-seitig mit Fahrbahntrennung | km | 12.385 | 0% | proportional zur Netzentwicklung | 12.385 | -2% | proportional zur Netzentwicklung |
| Schutzplanken 2-seitig | km | 32.837 | 0% | | 32.837 | -2% | |
| Schilderbrücken | Stück | 22.782 | 0% | | 22.782 | -2% | |
| Leitpfosten | Stück | 4.916.192 | -1% | | 4.896.461 | -3% | |
| Verkehrszeichen | Stück | 10.413.444 | -1% | | ########## | -3% | |
| Leuchten | Stück | 9.506.901 | -1% | | 9.454.845 | -3% | |
| Lichtzeichenanlagen | Stück | 85.353 | -1% | | 84.886 | -3% | |

Tabelle 56: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Schienenverkehrsinfrastruktur

| Schienenverkehrsinfrastruktur | *Einheit* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gleise** | | | | | | | |
| eingleisig | km | 15.915 | 0 % | Bergmann et al. 2015 | 16.328 | 3 % | nach Holzhey 2010/2012 |
| zweigleisig | km | 24.304 | 0 % | | 24.935 | 3 % | |
| **Energieversorgung** | | | | | | | |
| Unterwerke | Stück | 200 | 0 % | proportional zu Gleisentwicklung | 204 | 2 % | proportional zu Gleisentwicklung |
| Oberleitung HGS | km | 5.980 | 0 % | | 6.069 | 1 % | |
| Oberleitung HGS Tunnel | km | 524 | 0 % | | 524 | 0 % | |
| Oberleitung ABS | km | 16.397 | 0 % | | 17.006 | 4 % | |
| Oberleitung ABS Tunnel | km | 99 | 0 % | | 99 | 0 % | |
| Oberleitung andere | km | 34.102 | 0 % | | 34.611 | 1 % | |
| Oberleitung andere Tunnel | km | 288 | 0 % | | 288 | 0 % | |
| **Signal- und Komm.technik** | | | | | | | |
| Kabeltrog | km | 33.737 | 0 % | proportional zu Gleisentwicklung | 34.613 | 3 % | proportional zu Gleisentwicklung |
| Kabel | km | 33.737 | 0 % | | 34.613 | 3 % | |
| LZB | km | 33.737 | 0 % | | 34.613 | 3 % | |
| Signale | km | 33.737 | 0 % | | 34.613 | 3 % | |

Tabelle 57: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Luftverkehrsinfrastruktur

| Luftverkehrsinfrastruktur | Einheit | Wert 2030 | Prozentuale Änderung ggü Referenz | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung ggü Referenz | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Start- und Landebahn** | | | | | | | |
| Beton | m² | 3.109.805 | 0% | proportional zur Verkehrsleistung | 3.109.805 | -15% | proportional zur Verkehrsleistung |
| Asphalt | m² | 2.185.636 | 0% | | 2.185.636 | -15% | |
| Asphalt / Beton | m² | 810.192 | 0% | | 810.192 | -15% | |
| **Vorfelder und Rollbahnen** | | | | | | | |
| Beton | m² | 20.408.506 | 0% | proportional zur Verkehrsleistung | 20.408.506 | -15% | proportional zur Verkehrsleistung |
| Asphalt | m² | 5.711.645 | 0% | | 5.711.645 | -15% | |
| **versiegelte Schultern** | m² | 2.442.253 | 0% | | 2.442.253 | -15% | |
| **Sonst. Vesiegelte Flächen** | m² | 4.373.072 | 0% | | 4.373.072 | -15% | |
| **Gebäude** | | | | | | | |
| Terminals | m² | 1.111.821 | 0% | proportional zur Verkehrsleistung | 1.111.821 | -15% | proportional zur Verkehrsleistung |
| sonstige | m² | 3.240.338 | 0% | | 3.240.338 | -15% | |

Tabelle 58: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Innovationen im Verkehr“; Informations- und Kommunikationsinfrastruktur

| IKT-Infrastruktur | Einheit | Wert 2030 | Prozentuale Änderung ggü Referenz | Begründung | Wert 2050 | Prozentuale Änderung ggü Referenz | Begründung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Großes Rechenzentrum | Stück | 178 | 35% | eigene Annahmen | 315 | 50% | eigene Annahmen |
| Gebäude Rechenzentren | m² | 1.952.112 | 14% | | 3.277.800 | 20% | |
| Mobilfunkstationen | Stück | 231.240 | 54% | | 369.000 | 100% | |

## 2.5 Mengengerüst Fallstudie „Kreislaufwirtschaft und Ressourceneffizienz“

Tabelle 59: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Straßenverkehrsinfrastruktur

| Straßenverkehrs-infrastruktur | *Einheit* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Straßen** | | | | | | | |
| Landesstraße | km | 91.762 | 0% | | 90.624 | -3% | Rückbaupotential, erste Hochrechnung |
| Kreisstraße | km | 96.545 | 0% | | 91.605 | -7% | |
| Gemeindestraße | km | 473.672 | 0% | | 479.176 | -0,5% | |
| **Brücken** | m² | 33.669.902 | 0% | | 34.321.159 | -1,5% | |
| **Tunnel** | m² | 3.352.085 | 0% | | 3.433.346 | -1,5% | |
| **Straßenmeistereien** | | | | | | | |
| sonstige | m² | 5.869.949 | 0% | | 5.871.313 | -1,6% | proportional zur Netzentwicklung |
| **Zubehör** | | | | | | | |
| Schutzplanken 2-seitig | km | 32.837 | 0% | 0 | 33.111 | -0,8% | proportional zur Netzentwicklung |
| Leitpfosten | Stück | 4.946.008 | 0% | 0 | 4.956.728 | -1,4% | |
| Verkehrszeichen | Stück | 10.532.708 | 0% | 0 | 10.614.323 | -0,8% | |
| Leuchten | Stück | 9.585.562 | 0% | 0 | 9.591.960 | -1,5% | |
| Lichtzeichenanlagen | Stück | 86.059 | 0% | 0 | 86.117 | -1,5% | |

Tabelle 60: Mengengerüst der gegenüber dem Referenzszenario veränderten Infrastrukturbestandteile in der Fallstudie „Kreislaufwirtschaft & Ressourceneffizienz“; Energieversorgungsinfrastruktur

| Stromerzeugung | *Einheit* | *Wert 2030* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* | *Wert 2050* | *Prozentuale Änderung ggü Referenz* | *Begründung* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Stück | 302 | -99% | Sinkender Stromverbrauch | 300 | -98% | Sinkender Stromverbrauch |
| | Stück | 5.828 | -59% | | 5.478 | -53% | |