

CLIMATE CHANGE

36/2019

# Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität

RESCUE - Studie



CLIMATE CHANGE 36/2019

# **Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität**

RESCUE - Studie

von

Katja Purr, Jens Günther, Harry Lehmann und Philip Nuss

sowie


Kirsten Adlunger, Frederike Balzer, Juliane Berger, Maja Bernicke, Andreas Bertram, Anne Biewald, Folke Dettling, Detlef Drosihn, Eric Fee, Matthias Futterlieb, Ulrich Gromke, Dirk Günther, Benno Hain, Reinhard Herbener, Katja Hofmeier, Fabian Jäger-Gildemeister, Guido Knoche, Yvonne Koch, Anna Koska, Jan Kosmol, Matthias Koller, Juri Krack, Kora Kristof, Antje Kropf, Martin Lambrecht, Martin Lange, Christian Lehmann, Sandra Leuthold, Christiane Lohse, Ullrich Lorenz, Benjamin Lünenbürger, Petra Mahrenholz, Kerstin Martens, Lars Mönch, Lennart Mohr, Felix Müller, Stephan Naumann, Diana Nissler, Nathan Obermaier, Kirsten op de Hipt, David Pfeiffer, Marie-Luise Plappert, Sebastian Plickert, Christopher Proske, Bettina Rechenberg, Almut Reichart, Stefan Rother, Manuel Rudolph, Inke Schauser, Martin Schmied, Jens Schuberth, Joscha Steinbrenner, Carla Vollmer, Max Werlein


Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Redaktion:

Fachgebiet V1.2 „Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie“  
Katja Purr und Kirsten op de Hipt

Fachgebiet I1.1 „Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und –szenarien,  
Ressourcenschonung“  
Jens Günther, Philip Nuss und Antje Kropf

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, November 2019

**2. Auflage Juni 2021**



## Vorwort

### Vorwort der Präsidentin des Umweltbundesamt Maria Krautzberger



Deutschland muss als Industriestaat international Verantwortung übernehmen. Unser Wohlstand fußt auf der Nutzung fossiler Energieträger, der Ausbeutung weltweiter Ressourcen und unserer intensiven Landnutzung. Wir sind dadurch mit Hauptverursacher der heutigen Umweltprobleme und der globalen Klimakatastrophe.

Es ist oft gesagt worden und ich betone es nochmal: wir müssen, wenn wir das System Erde für uns bewohnbar halten wollen, sofort mit einer drastischen Senkung der Emission von Klimagasen beginnen. Gleichzeitig den Ressourcenverbrauch bis 2050 mindesten halbieren und die Neuversiegelung von Flächen beenden. Unser bisheriges Handeln ist dafür ungenügend.

Das Umweltbundesamt (UBA) untersucht schon seit vielen Jahren, wie die Ziele einer nachhaltigen Entwicklung sowie einer treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Lebensweise erreicht werden können. Dazu haben wir am UBA ein interdisziplinäres Projekt gestartet. „RESCUE-Projekt“ (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität), es soll uns auf den Pfad bringen, wie wir von heute bis ins Jahr 2050 diese Ziele erreichen können. Dieses Projekt ist mit einem hohen Anteil an „Eigenforschung“ des UBA und einer intensiven Einbindung externer Wissenschaftler gelungen.

Unsere Szenarioanalyse geht von optimistischen Grundannahmen aus: Deutschland ist in 2050 etwa auch weiterhin ein exportierendes Industrieland. Die Ergebnisse einzelner Pfade beleuchten auch, inwieweit Verhaltensänderungen, andere Lebensstile und die Entwicklung veränderter Konsummuster notwendig sind, um die Ziele zu erreichen. Ob diese Pfade global umsetzbar sind, welche Technologien wir weiter entwickeln müssen, wo Ressourcenknappheiten erwartbar sind, werden ebenfalls diskutiert.

Es war unser Anliegen, dort wo es möglich war, durch Variationen der Parameter und unterschiedliche Szenarioansätze, Lösungsräume zu beschreiben und damit verschiedene Handlungsalternativen aufzuzeigen.

Wir sehen es klar: wir haben die Technologien, die Maßnahmen und das Wissen, um die Transformation unserer technischen und gesellschaftlichen Systeme durchführen zu können. Uns ist wichtig, die aufgeworfenen Fragen, etwa zu Lebensstilen oder einem Nullwachstum der Industriestaaten breit zu debattieren. Dies darf nicht davon ablenken, dass es höchste Zeit zu handeln ist. Ein Verzug bedeutet ein mögliches Verfehlen unserer Treibhausgasminderungsziele mit schrecklichen globalen Auswirkungen.

Das Umweltbundesamt soll als wissenschaftliche Behörde Gesellschaft und Politik informieren und beraten. Dieser Auftrag umfasst meines Erachtens auch das Mahnen. Unsere Gesellschaft muss eine Kehrtwende vollziehen. Die Faktenbasierte Analyse unserer RESCUE-Studie mit seinen Szenarien belegt dies. Helfen Sie mit bei der Umsetzung eines anspruchsvollen Klima- und Ressourcenschutzes. Die Kinder dieser Welt sollen eine hoffnungsvolle Zukunft vor sich haben.

Präsidentin des Umweltbundesamt

## Vorwort des Projektleiters Harry Lehmann



Bereits in den 1990er Jahren, wurden in verschiedenen Studien, mögliche Wege zu einer dauerhaften und umweltgerechten Entwicklung aufgezeigt.<sup>1</sup> Die „Grundanforderung“ einer nachhaltigen Entwicklung ist, dass die Funktionen der Umwelt, d. h. die natürlichen Lebensgrundlagen in ihren verschiedenen Rollen für diese und die nächsten Generationen nicht weiter gefährdet sind.

In keinem anderen Land ist die Frage einer künftigen nachhaltigen Energieversorgung so detailliert durch Studien, Szenarien und Kommissionen untersucht und öffentlich debattiert worden wie in Deutschland. Ein wichtiges

Ergebnis ist: Deutschland kann mit erneuerbaren Energien, mit einer sektorübergreifenden Vernetzung und einer effizienteren Nutzung der Energien die Ziele des Klimaschutzes erreichen – und dies ohne Atomenergie.<sup>2</sup>

Das Aufzeigen der technischen Machbarkeit war ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität. Die Transformation braucht allerdings eine deutlich erweiterte Perspektive. Die Wechselwirkungen zwischen Ressourcenschonung und Klimaschutz erfordern einen systemischen und interdisziplinären Ansatz.

In einem langjährigen eigenen Forschungs- und Kooperations-Projekts des UBA, mit externer Unterstützung auf Basis von Forschungsvorhaben, wurde an Hand von mehreren Szenarien ein möglicher Lösungsraum für diesen Transformationsprozess aufgezeigt.

Wichtige Fragen des „RESCUE-Projekt“ (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität), sind dabei:

- ▶ Was sind plausible und nachhaltige Wege hin zu einem treibhausgasneutralen, post-fossilen und dabei möglichst ressourcenschonenden Deutschland 2050 auf Basis heute schon existierender Technologien?
- ▶ Welche Instrumente und Maßnahmen brauchen wir, um dies umzusetzen?
- ▶ Wie entwickelt sich der Rohstoffbedarf in einem treibhausgasneutralen Deutschland bis 2050?
- ▶ Wie beeinflussen sich Klima- und Ressourcenschutz gegenseitig?
- ▶ Existieren ressourcen- und rohstoffsparende Ansätze und Möglichkeiten eine treibhausgasneutrale Wirtschaft zu erreichen?
- ▶ Welche Probleme (z. B. Rohstoffknappheiten z. B. Kupfer) sind heute schon absehbar?

Ein Thema, welches bei der Erstellung der Szenarien immer wichtiger wurde, ist die Frage des Lebensstils. Unser privater Konsum, der Wohlstand den wir akkumulieren, die Art wie wir unser Wohlbefinden erreichen, ist für die Erreichung der Klimaschutzziele und einer fairen Verteilung der Entwicklungschancen in dieser und den nächsten Generationen essentiell. Es fängt bei der

---

<sup>1</sup> siehe hierzu u. a. „Nachhaltiges Deutschland – Wege zu einer dauerhaft und umweltgerechten Entwicklung“ (UBA, 1998) und „Zukunftsfähiges Deutschland in einer globalisierten Welt“ (Loske & Bleischwitz, 1996).

<sup>2</sup> Siehe hierzu u. a. die UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c).

Ernährung an, betrifft die Lebensdauer von Produkten und hört bei der Menge der Flüge pro Person und Jahr nicht auf. Natürlich können wir die Frage nach dem „Wieviel ist genug“ letztlich nicht beantworten – ohne eine Begrenzung unseres Lebensstils werden wir die Ziele nicht erreichen und die globalen Ungerechtigkeiten immer stärker werden.

Die Frage der Art und Weise wie wir die Wirtschaftsleistung und den Wohlstand messen ist in Frage zu stellen. Das Projekt zeigt deutlich das wir mit der klassischen Messung – Bruttosozialprodukt – keine Aussagen bekommen, mit denen wir eine solche Transformation, umsetzen können.

Schon zu Beginn des Projektes haben wir aus Vorsorgegründen entschieden eine Lösung ohne CCS, ohne Geo-Engineering und ohne Atomkraft zu suchen. Wir haben die Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Biomasse) deutlich eingeschränkt. Und sind optimistisch davon ausgegangen, das andere Länder und Regionen, insbesondere die EU, auch einen solchen Weg gehen wird.

Wir haben in diesem Projekt an vielen Stellen Neuland betreten.<sup>3</sup> Wir haben eine intensive und interdisziplinäre Arbeit von Beginn des Projektes sicherstellen müssen. Wir haben interne und externe Mitarbeiter gehabt. Wir haben Forschungsprojekte initiiert und ausgewertet. Um dies zu koordinieren ist eine RESCUE Steuerungsgruppe<sup>4</sup> eingesetzt worden. Deren erste Sitzung im Mai des Jahres 2015 war und bis heute ca. 45 Sitzungen hatte.

Die Aufgaben der Steuerungsgruppe waren die Sicherung der Plausibilität und Kontinuität der Szenarioannahmen. Das Protokollieren und Festhalten unseren Projektbeschlüssen, hat uns nicht ermöglicht alle aktuellen Entwicklungen zu folgen – insbesondere bei der langen Laufzeit des Projektes. Andererseits sind dadurch die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien miteinander vergleichbar und wir haben vermieden bei jeder personellen Veränderung neu zu diskutieren. Die Steuerungsgruppe hat thematische Arbeitsgruppen initiiert und deren Ergebnisse in den Gesamtprozess eingebunden. Eine wichtige Aufgabe war auch die Qualitätssicherung.

In mehreren Workshops und einer internationalen Konferenz haben wir Zwischenergebnisse vorgestellt und diskutiert – allerdings hat sich die Steuerungsgruppe darauf verständigt – am Ende des Projektes, in einer gemeinsamen Veröffentlichung die Ergebnisse vorzustellen. Wir denken, nur im Zusammenhang sind die vielen Facetten dieses Projektes zu verstehen.

Auf dem Wege sind uns Bereiche aufgefallen in denen wir schnell handeln müssen. Sei es um „stranded investments“ zu vermeiden oder um den langen Investitionszyklen gerecht zu werden. Ein Beispiel sind unsere Aktivitäten bei der Suche nach einer technischen Lösung für den Luftverkehr. Bereits in 2014 haben wir hier vorgeschlagen „Power to Liquid“ (PTL), statt Bioenergie als Technologischen Pfad zu wählen. Konsequenterweise haben wir zusätzliche Studien in diesem Bereich durchgeführt und diese Ergebnisse in die deutsche und internationale Diskussion eingebracht.

Die Transformationspfade führen alle in eine treibhausgasneutrale und Ressourcen leichter Zukunft. Ich bin besonders froh, dass es uns gelungen ist, im „GreenSupreme“ Szenario einen Blick auf einen Transformationspfad zu werfen der global auch mit Blick auf die Rohstoffinanspruchnahme umsetzbar ist. Dieses Szenario wäre ein Pfad für die Welt einen Teil

---

<sup>3</sup> Bspw. wie „schwer“ ist ein kWh aus verschiedenen Technologien – d. h. wieviel Ressourcen braucht man um diese zu erzeugen.

<sup>4</sup> Teilnehmende waren die Fachbereichsleitungen der Fachbereiche I, Herr Lehmann, II, Frau Busse und III, Frau Rechenberg sowie weitere Führungskräfte: Abteilungsleitung I1, Frau Kristof, I2, Herr Schmied, V1 Herr Krause und ehemals Herr Leprich, III2 ehemals Herr Heidemeier (†) und Fachgebietsleitungen I1.1 Herr Koller, V1.2 Herr Hain und III2.2 Herr Kessler. Gleichfalls das RESCUE-Kernteam auf Mitarbeitendenebene V1.2 Frau Purr und I1.1 Herr Günther, Herr Nuss und zeitweise Herr Lorenz. Geleitet durch Harry Lehmann.

der Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Nicht überraschend bedeutet es Nullwachstum des Bruttonationalprodukts in den Industrieländern. Das Einfrieren unseres „Wohlstandes“ auf einem relativ hohen Niveau gibt anderen Regionen die Chance aufzuholen und in 2050 Treibhausgasneutral zu sein. Dieses Szenario zeigt aber auch auf, dass wir noch viel leisten müssen um zu einer besseren Ressourcennutzung zu kommen. Es zeigt auf dass nicht Energie der limitierende Faktor ist, sondern die Rohstoffe und Ressourcen.

Alle diese Green-Szenarien der RESCUE-Studie sind nur machbar, wenn wir sofort mit der Transformation beginnen. Konsequentes und sofortiges Handeln ist nötig!!!

Harry Lehmann (Leiter Steuerungsgruppe)



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
Inhaltsverzeichnis .....	10
Abbildungsverzeichnis .....	14
Tabellenverzeichnis .....	21
Abkürzungsverzeichnis .....	23
Zusammenfassung .....	27
1 Einleitung .....	37
2 Ausgangslage für Deutschland .....	42
3 Integrierte Betrachtung .....	52
3.1 Die Green-Szenariofamilie .....	57
3.2 GreenEe .....	59
3.3 GreenLate .....	60
3.4 GreenMe .....	62
3.5 GreenLife .....	64
3.6 GreenSupreme .....	66
3.7 Zusammenfassung der Green-Szenariofamilie .....	68
4 Methodik .....	71
5 Handlungsfelder .....	75
5.1 Einleitung .....	75
5.2 Energieversorgung .....	77
5.2.1 Sektorkopplung .....	80
5.2.2 Entwicklung der Endenergiebedarfe .....	91
5.2.3 Entwicklung der Stromversorgung .....	96
5.2.4 Entwicklung der Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung .....	135
5.2.5 Infrastrukturen für die Energieversorgung .....	143
5.2.6 Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen .....	148
5.2.7 Schlussfolgerungen für die Energieversorgung .....	151
5.3 Bauen und Wohnen .....	156
5.3.1 Einleitung .....	156
5.3.2 Flächenneuanspruchnahme .....	159
5.3.3 Entwicklung des Gebäudebestandes .....	160
5.3.4 Entwicklung der Energiebedarfe und deren Versorgung .....	168
5.3.5 Tiefbau .....	177

5.3.6	Entwicklung ausgewählter Rohstoffbedarfe und Flächenneuanspruchnahme.....	180
5.3.7	Schlussfolgerungen für den Transformationspfad .....	186
5.4	Mobilität.....	190
5.4.1	Bausteine der Transformation im Verkehr .....	191
5.4.2	Lösungsräume für den Transformationsprozess in der Mobilität .....	192
5.4.3	Verkehrsleistung .....	194
5.4.4	Endenergieverbrauch.....	203
5.4.5	Treibhausgasemissionen.....	218
5.4.6	Beiträge der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr in den Szenarien .....	220
5.4.7	Rohstoffe.....	222
5.4.8	Schlussfolgerungen für den Transformationspfad .....	229
5.5	Industrielle Produktion .....	231
5.5.1	Einleitung .....	231
5.5.2	Eisen- und Stahlerzeugung.....	236
5.5.3	NE-Metallindustrie.....	243
5.5.4	Gießereien.....	248
5.5.5	Chemische Industrie .....	254
5.5.6	Zementindustrie.....	258
5.5.7	Kalkindustrie .....	264
5.5.8	Glasindustrie .....	269
5.5.9	Papier- und Zellstoffindustrie .....	273
5.5.10	Nahrungsmittelindustrie.....	276
5.5.11	Sonstige Branchen .....	280
5.5.12	Sonstige industrielle Emissionsquellen.....	283
5.5.13	Zusammenfassung .....	288
5.5.14	Schlussfolgerungen .....	290
5.6	Abfall und Abwasser .....	292
5.6.1	Abfallwirtschaft.....	293
5.6.2	Abwasserwirtschaft .....	295
5.6.3	Beitrag zur Energieversorgung.....	296
5.6.4	Schlussfolgerungen .....	299
5.7	Landwirtschaft und Landnutzung .....	299
5.7.1	Technische Minderungsmaßnahmen .....	302
5.7.2	Kalkung.....	304

5.7.3	Ökolandbau.....	304
5.7.4	Lebensmittelabfälle .....	305
5.7.5	Torfabbau reduzieren .....	305
5.7.6	Erhalt der Waldkohlenstoffsенке .....	305
5.7.7	Ernährung und Konsum .....	306
5.7.8	Viehbestände .....	308
5.7.9	Produktion von landwirtschaftlichen Produkten.....	310
5.7.10	Wiedervernässung von Moorböden .....	311
5.7.11	Flächenneuinanspruchnahme.....	313
5.7.12	Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	316
5.7.13	Schlussfolgerungen .....	321
6	Wirkungen .....	323
6.1	Treibhausgasemissionen .....	323
6.1.1	Sektorale Entwicklung der Green-Szenarien und Einordnung in die nationalen klimapolitischen Ziele .....	323
6.1.2	Entwicklungen der Treibhausgasemissionen in den Green-Szenarien und Einordnung in die nationalen klimapolitischen Ziele.....	337
6.1.3	Einordnung in die globalen klimapolitischen Herausforderungen .....	343
6.1.4	Aufsummierte Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien .....	346
6.1.5	Green-Szenarien im Kontext der Klimaschutzpolitik in Europa.....	348
6.1.6	Schlussfolgerungen für die nationale Klimapolitik .....	351
6.2	Rohstoffinanspruchnahme.....	352
6.2.1	Rohstoffinanspruchnahme in den Green-Szenarien.....	354
6.2.2	Zirkularität der deutschen Volkswirtschaft.....	359
6.2.3	Nachfrage nach einzelnen Rohstoffen für die Transformation .....	363
6.2.4	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf.....	371
6.2.5	Kumulierter RMC Vergleich .....	373
6.2.6	Bedürfnisfelder im Vergleich .....	374
6.2.7	Entwicklung der Rohstoffproduktivität bis 2050 .....	378
6.2.8	Weitere Umweltwirkungen .....	379
6.2.9	Schlussfolgerungen für die nationale Ressourcenpolitik.....	385
6.3	Globale Wirkungen der Transformation des Energiesystems auf die Rohstoffinanspruchnahme.....	389
6.3.1	Die globalen Szenarien.....	389



6.3.2	Entwicklung der Rohstoffinanspruchnahme bei der Transformation des globalen Energieversorgungssystems .....	391
6.3.3	Schlussfolgerungen aus der globalen Betrachtung.....	402
7	Schlussfolgerungen.....	404
7.1	Zentraler Handlungsbedarf .....	404
7.1.1	Substitution.....	406
7.1.2	Vermeidung.....	409
7.1.3	Senken.....	413
7.2	Weiterer Forschungsbedarf .....	414
7.3	Fazit .....	416
	Quellenverzeichnis .....	419

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0-1: Überblick über die charakteristischen Einflussfaktoren der Green-Szenarien.....	28
Abbildung 0-2: Minderungen der Green-Szenarien bis 2050 .....	31
Abbildung 0-3: Entwicklung der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien unter Berücksichtigung von LULUCF (konservativ) und den CO <sub>2</sub> -Emissionen der international verursachten Verkehre .....	33
Abbildung 0-4: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffkategorien in den sechs Szenarien (2010 bis 2050), Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME) .....	34
Abbildung 1-1: Planetare Grenzen nach (Steffen et al., 2015) .....	37
Abbildung 1-2: Globale Rohstoffentnahme (a), Aufbau des anthropogenen Lagers (b) und global gemittelte Treibhausgasemissionen (c).....	39
Abbildung 1-3: Darstellung von globalen Treibhausgasprojektionen bis 2100 .....	40
Abbildung 2-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Kategorien .....	44
Abbildung 2-2: Relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen seit 1990 nach Sektoren .....	45
Abbildung 2-3: Qualitative Einschätzung Erreichbarkeit von Treibhausgasminderungszielen im Kontext des aktuellen Trends .....	46
Abbildung 2-4: Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität (oben) und der pro-Kopf Rohstoffnutzung (unten) in Deutschland .....	48
Abbildung 2-5: qualitative Einschätzung weiterer Umwelttrends im Vergleich zu den Zielen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie.....	50
Abbildung 3-1: Kausaldigramm (CLD) des Zusammenhanges zwischen Ressourceninanspruchnahme und THG-Emissionen .....	53
Abbildung 3-2: Ausschnitt des CLD mit Fokus auf das den Kreislauf „Produktion-Konsum“ und den damit verbundenen Energiebedarf .....	54
Abbildung 3-3: Ausschnitt des CLD mit Fokus auf den Zusammenhang Rohstoffe und Energieversorgung.....	55
Abbildung 3-4: Ausschnitt des CLD mit Fokus auf das "Ressourcensystem".....	56
Abbildung 3-5: CLD mit Ansatzpunkten für Maßnahmen .....	57
Abbildung 3-6: Vergleich der charakteristischen Einflussfaktoren für GreenEe1 und GreenLate .....	68
Abbildung 3-7: Vergleich der charakteristischen Einflussfaktoren für GreenEe2, GreenMe und GreenLife .....	69
Abbildung 3-8: Vergleich der charakteristischen Einflussfaktoren für GreenEe2, GreenLate und GreenSupreme .....	70
Abbildung 4-1: 1. Arbeitsschritt bei der Modellierung .....	72
Abbildung 4-2: ergänzender 1. Arbeitsschritt bei der Modellierung von GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme.....	72
Abbildung 4-3: 2. Arbeitsschritt bei der Modellierung .....	73
Abbildung 4-4: 3. Arbeitsschritt bei der Modellierung .....	74
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des gemeinschaftlichen Transformationspfades der Emissionsquellgruppen.....	77
Abbildung 5-2: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern .....	78
Abbildung 5-3: Qualitative Darstellung der Änderungen der Treibhausgasemissionen und Rohstoffinanspruchnahme aus der Energieversorgung (links) sowie qualitative	

Darstellung der Rohstoffanspruchnahme in Abhängigkeit der Umstrukturierung des Energiesystems auf erneuerbare Energien (rechts) .....	79
Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der klassischen (oben) und zukünftigen (unten) Sektorkopplung .....	81
Abbildung 5-5: Schematische Funktionsweise von PtG und PtL .....	82
Abbildung 5-6: Substitutionswirkung von PtX-Techniken .....	84
Abbildung 5-7: Schematische Darstellung Kohlenstoffnutzung in PtG/PtL-Anlagen .....	85
Abbildung 5-8: Spannweiten für CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten für den Einsatz von erneuerbarem Strom – Differenzbetrachtung in Bezug auf fossile Energieträger .....	86
Abbildung 5-9: Integration der PtH-Technik in der Raumwärmeversorgung in ausgewählten Green-Szenarien .....	88
Abbildung 5-10: Integration der Elektromobilität in den Green-Szenarien im Straßenpersonenverkehr* .....	89
Abbildung 5-11: Integration von PtG-Wasserstoff zur Deckung des Wasserstoffbedarfs in ausgewählten Green-Szenarien .....	90
Abbildung 5-12: Entwicklung der Endenergiebedarfe im Bereich private Haushalte nach Energieträgern in den Green-Szenarien .....	92
Abbildung 5-13: Endenergiebedarfe im Bereich GHD nach Energieträgern in den Green-Szenarien ..	93
Abbildung 5-14: Endenergiebedarfe im Bereich Industrie nach Energieträgern in den Green-Szenarien .....	94
Abbildung 5-15: Endenergiebedarfe im Bereich Verkehr nach Energieträgern .....	95
Abbildung 5-16: Entwicklung der Stromerzeugung in den Green-Szenarien: oben installierte Leistung und unten Stromerzeugung .....	98
Abbildung 5-17: Entwicklung Emissionsbelastung im Strommix in den Green-Szenarien bis 2050 ....	99
Abbildung 5-18: Kohlekraftwerke in den Green-Szenarien im Vergleich zu den Empfehlungen der WSB-Kommission .....	101
Abbildung 5-19: Entwicklung der Gaskraftwerke in den Green-Szenarien bis 2050 .....	103
Abbildung 5-20: Installierte Leistung von Windenergie an Land und Photovoltaik in den Green-Szenarien .....	104
Abbildung 5-21: Ausgewählte Rohstoffnutzung einiger Energieerzeugungsanlagen nach heutigem Stand .....	105
Abbildung 5-22: Szenario GreenE2- Windenergie an Land: Berechneter Nettozubau, Rückbau, Bruttozubau und Stromerzeugung .....	106
Abbildung 5-23: Vergleich des sich ergebenden Bruttozubaus und der installierten Leistung aus dem GreenLate Szenario für Windenergie an Land bei Erreichung aller Zwischenziele und bei Auslassen des Zwischenziels 2040 .....	108
Abbildung 5-24: Entwicklung der installierten Kapazitäten von Windenergie auf See und daraus resultierenden Stromerzeugung in den Green-Szenarien .....	122
Abbildung 5-25: Entwicklung des Beitrages der tiefen Geothermie zur Endenergieversorgung in den Green-Szenarien .....	127
Abbildung 5-26: qualitative Darstellung der Nutzung von Biomasse zur Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung .....	129

Abbildung 5-27: Entwicklung der genutzten Endenergie und der Verwendung biogener Quellen in den Green-Szenarien (ohne Klärgas und industrielle Ströme).....	131
Abbildung 5-28: Entwicklung der Inanspruchnahme der Fläche durch Windenergie an Land und Photovoltaik in den Green-Szenarien.....	135
Abbildung 5-29: Qualitative Darstellung zur erneuerbaren Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung Deutschlands in den Green-Szenarien .....	138
Abbildung 5-30: Zeitliche Entwicklung der Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung Deutschlands in den Green-Szenarien nach Anwendungsbereichen und Importen.....	140
Abbildung 5-31: Entwicklung des Ausbaus der erneuerbaren Energien für die Importe für die verschiedenen Green-Szenarien .....	142
Abbildung 5-32: Entwicklung der PtG/PtL-Produktionskapazitäten für die verschiedenen Green-Szenarien .....	142
Abbildung 5-33: Entwicklung von Gas als Endenergieträger in den verschiedenen Bereichen.....	147
Abbildung 5-34: Entwicklung des Anteils erneuerbaren Energien an der Energieversorgung für die verschiedenen Green-Szenarien .....	149
Abbildung 5-35: Entwicklung des Endenergiebedarfes der Green-Szenarien .....	150
Abbildung 5-36: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Energie nach der UNFCC-Berichterstattung für alle Green-Szenarien .....	151
Abbildung 5-37: Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Gebäuden .....	157
Abbildung 5-38: Qualitative Darstellung des Lösungsraumes für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand im Jahr 2050, abhängig vom Start der politischen Instrumente .....	158
Abbildung 5-39: Entwicklung der absoluten bewohnten Wohnfläche im Vergleich .....	161
Abbildung 5-40: Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche der Szenarien im Vergleich .....	162
Abbildung 5-41: Entwicklung des Endenergiebedarfes (inkl. Umgebungswärme) in Gebäuden für die Green-Szenarien .....	169
Abbildung 5-42: Ziele der Szenarien für den Gebäudebestand des Jahres 2050.....	170
Abbildung 5-43: Entwicklung der Endenergie nach Heiztechniken in den verschiedenen Green-Szenarien .....	172
Abbildung 5-44: Entwicklung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in den Green-Szenarien	175
Abbildung 5-45: Entwicklung der Bedarfe an Bausand, Kies und Schotter (letzte inländische Verwendung) in den Green-Szenarien .....	181
Abbildung 5-46: Inanspruchnahme von Holz (letzte inländische Verwendung) in den Green-Szenarien .....	182
Abbildung 5-47: Kumulierter Rohstoffaufwand für Lüftungen, Wärmepumpen inkl. Flächenheizungen und Gebäudedämmungen im GreenEe1-Szenario.....	183
Abbildung 5-48: Rohstoffinanspruchnahme pro Person im Jahr 2050 für das Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt in den Green-Szenarien.....	184
Abbildung 5-49: Vergleich der Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr.....	185
Abbildung 5-50: Entwicklung der Betriebsfläche in den Green-Szenarien .....	186
Abbildung 5-51: Zusammenspiel von Verkehrswende und Energiewende im Verkehr zur vollständigen Minderung der THG-Emissionen 2050.....	190

Abbildung 5-52: Entwicklung der Personenverkehrsleistung nach Verkehrsarten in den Green-Szenarien .....	197
Abbildung 5-53: Entwicklung der Fahr- und Verkehrsleistung von Pkw nach Nutzungsart und Einsatzgebiet in den Green-Szenarien.....	198
Abbildung 5-54: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsarten in den Green-Szenarien .....	200
Abbildung 5-55: Entwicklung des Anteils umweltfreundlicher Verkehrsmittel im Personen-und Güterverkehr in den Green-Szenarien .....	201
Abbildung 5-56: Entwicklung der Verkehrsleistung des Deutschland anzurechnenden internationalen Seeverkehrs in den Green-Szenarien (nach Güterabteilungen gemäß NST2007 (Statistisches Bundesamt, 2008)) .....	202
Abbildung 5-57: Entwicklung der Verkehrsleistung im internationalen Luftverkehr (Personen) der Green-Szenarien .....	203
Abbildung 5-58: Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen nach Antriebsart in den Green-Szenarien ..	204
Abbildung 5-59: Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart in den Green-Szenarien.....	205
Abbildung 5-60: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im nationalen Personenverkehr nach Energieträger in den Green-Szenarien .....	207
Abbildung 5-61: Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen nach Antriebsart in den Green-Szenarien..	209
Abbildung 5-62: Entwicklung der Anteile am Lkw-Bestand nach Antriebsart in den Green-Szenarien .....	210
Abbildung 5-63: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im nationalen Güterverkehr nach Energieträger in den Green-Szenarien .....	212
Abbildung 5-64: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im internationalen Flug- und Seeverkehr in den Green-Szenarien .....	213
Abbildung 5-65: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr (nationale und internationale) nach Verkehrsmittel in den Green-Szenarien .....	215
Abbildung 5-66: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr (national und international) nach Energieträger und teilaggregierten Verkehrsmitteln in den Green-Szenarien .....	216
Abbildung 5-67: Direkte THG-Emissionen im Verkehr und Änderung der nationalen Verkehre gegenüber 1990.....	218
Abbildung 5-68: Änderung der nationalen THG-Emissionen im Verkehr gegenüber dem Jahr 2010	220
Abbildung 5-69: Beitrag zur Änderung der nationalen THG-Emissionen im Verkehr im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2010 .....	221
Abbildung 5-70: Materialzusammensetzung Pkw mit und ohne Leichtbau .....	224
Abbildung 5-71: Materialzusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (2010) und Lithium-Schwefel-Akkumulatoren (2050).....	225
Abbildung 5-72: kumulierter Rohstoffaufwand von 2010 bis 2050 für Akkumulatoren und Antriebsstrang im GreenEe1-Szenario .....	226
Abbildung 5-73: Bedarf an für Akkumulatoren relevanten Rohstoffen in den Green-Szenarien .....	227
Abbildung 5-74: Rohstoffkonsum pro Kopf in den Green-Szenarien für das Bedürfnisfeld Mobilität in 2050 .....	228

Abbildung 5-75: Relativer Primärrohstoffdurchsatz nach Wirtschaftssektoren (links) und Relativer Rohstoffkonsum (RMC) nach bereitstellenden Wirtschaftssektoren (rechts) in 2010 in Deutschland.....	233
Abbildung 5-76: Qualitative Darstellung der Minderung von industriell verursachten Treibhausgasemissionen .....	235
Abbildung 5-77: Entwicklung der Rohstahlproduktion und der Anteile der einzelnen Produktionsrouten in den Green-Szenarien.....	240
Abbildung 5-78: Entwicklung der Endenergiebedarfe der Stahlindustrie und der Anteile der eingesetzten Energieträger in den Green-Szenarien .....	241
Abbildung 5-79: Entwicklung der brennstoff- und der rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen der Stahlindustrie in den Green-Szenarien.....	242
Abbildung 5-80: Entwicklung der Produktionszahlen in der Aluminiumindustrie in den Green-Szenarien .....	245
Abbildung 5-81: Entwicklung des Endenergiebedarfs in der NE-Metallindustrie in den Green-Szenarien .....	246
Abbildung 5-82: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der NE-Metallindustrie in den Green-Szenarien .....	247
Abbildung 5-83: Entwicklung der Produktionsmengen in der Gießereiindustrie für verschiedene Gusswerkstoffe in den Green-Szenarien .....	250
Abbildung 5-84: Entwicklung der Endenergiebedarfe in der Gießereiindustrie in den Green-Szenarien .....	252
Abbildung 5-85: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Gießereiindustrie in den Green-Szenarien .....	253
Abbildung 5-86: Endenergiebedarf der chemischen Industrie in den Green-Szenarien .....	256
Abbildung 5-87: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der chemischen Industrie in den Green-Szenarien .....	257
Abbildung 5-88: Entwicklung der Produktionsmengen in der Zementindustrie in den Green-Szenarien .....	260
Abbildung 5-89: Endenergieverbrauch der Zementindustrie in den Green-Szenarien .....	262
Abbildung 5-90: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie in den Green-Szenarien .....	263
Abbildung 5-91: Entwicklung der Produktionsmengen in der Kalkindustrie in den Green-Szenarien .....	266
Abbildung 5-92: Endenergieverbrauch der Kalkindustrie in den Green-Szenarien .....	267
Abbildung 5-93: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Kalkindustrie in den Green-Szenarien .....	268
Abbildung 5-94: Entwicklung der Produktionsmenge in der Glasindustrie in den Green-Szenarien .....	270
Abbildung 5-95: Endenergiebedarf der Glasindustrie in den Green-Szenarien.....	271
Abbildung 5-96: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Glasindustrie in den Green-Szenarien .....	272
Abbildung 5-97: Entwicklung der Produktionsmenge an grafischen Papieren und Verpackungspapieren in den Green-Szenarien .....	274

Abbildung 5-98: Entwicklung der Energieverbräuche der Papierindustrie und der jeweiligen Anteile der.....	275
Abbildung 5-99: Entwicklung der THG-Emissionen der Papierindustrie bis 2050 in den betrachteten Szenarien .....	276
Abbildung 5-100: Entwicklung der Produktionsmenge in der Fleisch- und Milchverarbeitung in den Green-Szenarien .....	278
Abbildung 5-101: Entwicklung des Endenergiebedarfs in der Nahrungsmittelindustrie in den Green-Szenarien .....	279
Abbildung 5-102: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Nahrungsmittelindustrie in den Green-Szenarien .....	280
Abbildung 5-103: Entwicklung des Endenergiebedarfs der sonstigen Branchen in den Green-Szenarien bis 2050 .....	282
Abbildung 5-104: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der sonstigen Branchen in den Green-Szenarien bis 2050 .....	283
Abbildung 5-105: Entwicklung der NMVOC-Emissionen aus der Verwendung von Lösemitteln und anderen Produktverwendungen in den Green-Szenarien .....	285
Abbildung 5-106: Entwicklung der Emissionen fluorierter Treibhausgase in den Green-Szenarien ..	287
Abbildung 5-107: Entwicklung der Endenergiebedarfe im Bereich Industrie nach Endenergieträgern .....	289
Abbildung 5-108: Entwicklung der Treibhausgasemissionen über alle Bereiche der industriellen Produktion hinweg .....	290
Abbildung 5-109: Zeitlicher, szenariotypischer Verlauf der Treibhausgasemissionen der Sektoren Abwasser und Abfall .....	293
Abbildung 5-110: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der betrachteten Szenarien im Abfallbereich (Deponie, MBA, Kompostierung/Vergärung) .....	295
Abbildung 5-111: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Bereich Abwasser von 2030 bis 2050 der betrachteten Szenarien .....	296
Abbildung 5-112: Nutzungsmöglichkeiten von Klärgas in den unterschiedlichen Sektoren .....	297
Abbildung 5-113: PE basierte Treibhausgasemissionen anaerober und aerober Schlammstabilisierungsverfahren im zeitlichen Verlauf .....	298
Abbildung 5-114: Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft nach Kategorien .....	300
Abbildung 5-115: Treibhausgas-Emissionen im LULUCF-Sektor .....	301
Abbildung 5-116: Modellstruktur und Eingangsparameter von ALMOD .....	303
Abbildung 5-117: Verlauf der Wiedervernässung von organischen Böden bis 2050 .....	312
Abbildung 5-118: Entwicklung der landwirtschaftlichen Gesamtemissionen in den Green-Szenarien .....	316
Abbildung 5-119: Quellgruppenspezifische Ergebnisse der Modellierung der Landwirtschaft .....	317
Abbildung 5-120: Treibhausgasminderung der Landnutzung im GreenEe1-Szenario .....	318
Abbildung 5-121: Vergleich der Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien im Bereich Landnutzung (LULUCF) ohne Wald .....	319
Abbildung 6-1: Qualitative Einschätzung der Erreichbarkeit von Treibhausgasminderungszielen im Kontext des aktuellen Trends .....	323

Abbildung 6-2: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft für die Green-Szenarien bis 2050.....	326
Abbildung 6-3: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr für die Green-Szenarien bis 2050.....	328
Abbildung 6-4: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der von Deutschland verursachten internationalen Verkehre der Green-Szenarien .....	329
Abbildung 6-5: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude für die Green-Szenarien bis 2050 .....	332
Abbildung 6-6: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie für die Green-Szenarien bis 2050.....	334
Abbildung 6-7: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft für die Green-Szenarien bis 2050 .....	336
Abbildung 6-8: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Sonstige für die Green-Szenarien bis 2050 .....	337
Abbildung 6-9: Entwicklung der Treibhausgasemissionen bis 2030 .....	338
Abbildung 6-10: Minderungen der Green-Szenarien bis 2050.....	340
Abbildung 6-11: Treibhausgasminderung im Zielpunkt für GreenSupreme mit Berücksichtigung von LULUCF.....	342
Abbildung 6-12: Entwicklung der verbleibenden angerechneten Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien .....	344
Abbildung 6-13: Entwicklung der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien unter Berücksichtigung von LULUCF (konservativ) und den CO <sub>2</sub> -Emissionen der international verursachten Verkehre .....	345
Abbildung 6-14: Entwicklung der verbleibenden angerechneten Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien und EU 1.5 °C-Szenarien .....	350
Abbildung 6-15: Übersicht von Rohstoffindikatoren und damit verbundenen Stoffströmen .....	354
Abbildung 6-16: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffkategorien in den Green-Szenarien..	355
Abbildung 6-17: Dekomposition der Beiträge von Materialeffizienz, zusätzlichen Lebensstiländerungen und weiteren Annahmen zur Reduktion des RMC im GreenSupreme-Szenario in 2050.....	358
Abbildung 6-18: Raw Material Input (RMI) nach Rohstoffkategorien in den Green-Szenarien.....	359
Abbildung 6-19: Inländischer Materialkonsum in RME und Anteil an Sekundärmaterialien in den Green-Szenarien .....	361
Abbildung 6-20: Richtungstendenz in der Inanspruchnahme (letzte Inländische Verwendung) einzelner Rohstoffe im Zeitraum 2030 bis 2050 anhand von Sparklines .....	364
Abbildung 6-21: Letzte inländische Verwendung von Eisen, Kupfer und Aluminium.....	365
Abbildung 6-22: Anteil der letzten inländischen Verwendung (LIV) ausgewählter Materialien in Prozent an der globalen Produktion 2015/2016.....	367
Abbildung 6-23: Letzte inländische Verwendung von Lithium (Li) in Batterien (Sonderrechnung) im Vergleich zu globalen Produktionsdaten (in Metallgehalt) im Jahr 2016 .....	368
Abbildung 6-24: Rohstoffinanspruchnahme pro Person (RMC/Kopf) im Zeitraum 2010 bis 2050....	372
Abbildung 6-25: Kumulierter RMC im Zeitraum 2010 - 2050 im Vergleich für die sechs Green-Szenarien .....	373



Abbildung 6-26: RMC nach Kategorien der letzten Verwendung in 2050 .....	375
Abbildung 6-27: RMC des privaten Konsums im Jahr 2050 und aufgegliedert nach Bedürfnisfeldern für die sechs Green-Szenarien.....	377
Abbildung 6-28: Beitrag zu Umweltwirkungen aufgeteilt nach einzelnen Rohstoffkategorien (Extraktion und Weiterverarbeitung), der restlichen Volkswirtschaft und Haushalten.....	381
Abbildung 6-29: Relativer Vergleich potenzieller Umweltwirkungen verbunden mit der Produktion von 1 kg Material am Fabrikator („cradle-to-gate“).....	382
Abbildung 6-30: Übersicht über potenzielle Umweltgefährdungen bei der bergbaulichen Gewinnung von Rohstoffen nach dem ÖkoRes Project .....	383
Abbildung 6-31: Inanspruchnahme fossiler Rohstoffe (jährliche Basis) als Index ggü. 2020.....	392
Abbildung 6-32: Index der Rohstoffinanspruchnahme (fossile, abiotisch) im Energiesystem.....	393
Abbildung 6-33: Kumulierte Rohstoffinanspruchnahme für das Erneuerbare Energien System .....	394
Abbildung 6-34: Inanspruchnahme von Primärkupfer für das Erneuerbare Energie System.....	395
Abbildung 6-35: Inanspruchnahme des Kupfers (Primär- und Sekundärrohstoff) .....	396
Abbildung 6-36: Low-grade-Vorkommen von Kupfer in den Global-Szenarien.....	398
Abbildung 6-37: Erschöpfung der High-grade Vorkommen von Kupfer in den Global-Szenarien .....	399
Abbildung 6-38: Vergleich der globalen Entwicklung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen .....	400
Abbildung 6-39: Volkswirtschaftlicher Auswirkungen im Vergleich der Regionen im Global Supreme- Szenario .....	401
Abbildung 7-1: Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Strategie „Substitution“ .....	407
Abbildung 7-2: Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Strategie „Vermeidung“ .....	411
Abbildung 7-3: Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Strategie „Senken“ .....	413

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Überblick zu den verschiedenen Green-Szenarien .....	58
Tabelle 5-1: Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Energie .....	80
Tabelle 5-2: PtG-CH <sub>4</sub> /PtL-Produktionsmengen in Deutschland in den Green-Szenarien.....	91
Tabelle 5-3: Entwicklung der Endenergiebedarfe nach Energieträgern .....	96
Tabelle 5-4: Beitrag von Kohle zur Stromerzeugung 2030 in den Green-Szenarien.....	102
Tabelle 5-5: Durchschnittlicher Bruttozubau an Windenergie an Land für die Umsetzung der Green- Szenarien in den jeweiligen Zeiträumen in GW pro Jahr .....	109
Tabelle 5-6: Durchschnittlicher Bruttozubau der Photovoltaik in den Green-Szenarien in Abhängigkeit der Modul-Lebensdauer in GW pro Jahr .....	111
Tabelle 5-7: Parameterentwicklung der Windenergieanlagen auf See für GreenEe1, GreenLate, GreenEe2 und GreenLife .....	122
Tabelle 5-8: Annahmen zur tiefen Geothermie in den Green-Szenarien.....	126
Tabelle 5-9: Materialannahmen der Strominfrastruktur in GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife .....	144
Tabelle 5-10: Materialannahmen der Strominfrastruktur in GreenMe und GreenSupreme .....	145
Tabelle 5-11: Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Bauen und Wohnen .	158
Tabelle 5-12: Entwicklung der Flächenneuanspruchnahme (netto) in den Szenarien .....	160

Tabelle 5-13: Entwicklung der Gebäudeflächen in den Szenarien bis 2050 .....	163
Tabelle 5-14: Entwicklung des Anteils der Wohnfläche in unterschiedlichen Gebäudetypen im Neubau für GreenEe1 und GreenLife .....	164
Tabelle 5-15: Exemplarische Recyclinganteile für Hochbauanwendungen in GreenEe1 und GreenLate .....	165
Tabelle 5-16: Szenariospezifische Annahmen im Hochbau für GreenMe und GreenSupreme .....	165
Tabelle 5-17: Entwicklung der mittleren Sanierungsraten pro Jahr der Green-Szenarien .....	167
Tabelle 5-18: Entwicklung des mittleren Raumwärmebedarfs der Green-Szenarien .....	167
Tabelle 5-19: Rolle von Wärmepumpen in der Gebäudeversorgung in den Green-Szenarien .....	173
Tabelle 5-20: Übersicht postfossiler Energieversorgungsoptionen .....	192
Tabelle 5-21: Überblick der Szenarien im Bereich Verkehr .....	194
Tabelle 5-22: Effizienzentwicklung neuer Benzin-Pkw auf Autobahnen in den Green-Szenarien .....	207
Tabelle 5-23: Effizienzentwicklung neuer Sattelzüge (Dieselmotor) auf Autobahnen .....	211
Tabelle 5-24: Anteil unterschiedlicher Leichtbauvarianten an den Pkw Neuzulassungen in den Green- Szenarien .....	222
Tabelle 5-25: Angenommene durchschnittliche Reichweiten der Akkumulatoren neu zugelassener Pkw in den Green-Szenarien .....	226
Tabelle 5-26: Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Industrie .....	236
Tabelle 5-27: Charakteristik der verschiedenen Szenarien im Bereich Landwirtschaft und LULUCF .....	302
Tabelle 5-28: Übersicht über die Selbstversorgungsgrade wichtiger Ernährungsgüter .....	310
Tabelle 5-29: Überblick zu den Annahmen des Holzproduktspeichers der Green-Szenarien und des Naturschutzszenarios der WEHAM-Szenarien .....	320
Tabelle 6-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen, die auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden .....	339
Tabelle 6-2: Treibhausgasminderung im Zielpunkt (2050) der Green-Szenarien mit Berücksichtigung von LULUCF und internationalen Verkehren .....	342
Tabelle 6-3: Kumulierte Treibhausgasemissionen in den Green-Szenarien entsprechend der angerechneten Emissionen auf die Ziele der Bundesregierung .....	347
Tabelle 6-4: Annahmen zur Materialeffizienz und technologischen Entwicklung global in den Szenarien .....	357
Tabelle 6-5: Annahmen zum Recycling im Jahr 2050 .....	362
Tabelle 6-6: Besonders relevante Technologien nach Umwelttechnologieleitmärkten .....	370
Tabelle 6-7: Komponenten der Rohstoffproduktivität und Gesamtrohstoffproduktivität 2010-2050 sowie historischer Trend 1994-2010, jahresdurchschnittliche Veränderung in % .....	379

## Abkürzungsverzeichnis

APV	LAGA-Ausschuss für Produktverantwortung; FV
BEV	Battery Electric Vehicle (engl. für Elektrofahrzeug)
bevOH-Lkw	Oberleitungs-Lkw mit zusätzlichem Batteriespeicher (rein elektrischer Betrieb)
BGBI	Bundesgesetzblatt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BV Glas	Bundesverband Glasindustrie e.V., Düsseldorf
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Use
CLD	Causal Loop Diagram
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DiätV	Diätverordnung
DLMB	Deutsches Lebensmittelbuch
DRI-Anlagen	Direktreduktionsanlagen in der Stahlindustrie aus Eisenerzen hergestellter Eisenschwamm
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
E-Pkw	Pkw mit Elektromotor (reine Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybridelektrofahrzeuge)
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
FKW	vollfluorierte Kohlenwasserstoffe
FrSaftErfrischGetrV	Verordnung über Fruchtsaft, einige ähnliche Erzeugnisse, Fruchtnektar und koffeinhaltige Erfrischungsgetränke (Fruchtsaft- und Erfrischungs-getränkeverordnung)
GDB	Genossenschaft Deutscher Brunnen e.G., Bonn
GfK	GfK SE, Nürnberg
ggü.	gegenüber
GMH	große Mehrfamilienhäuser
GVM	GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, Mainz
GW	Gigawatt
GWP	Großwärmepumpe
HFKW	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe

APV	LAGA-Ausschuss für Produktverantwortung; FV
ICEV	internal combustion engine vehicle (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor und ohne extern-Lademöglichkeit für Strom).
IuK	Informations-und Kommunikationsinfrastruktur
JAZ	Jahresarbeitszahl
KSP	Klimaschutzplan
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
MFH	Mehrfamilienhäuser
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NEP	Netzentwicklungsplan
NF3	Stickstofftrifluorid
NMVOC	flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (non-methane volatile organic compounds)
NST2007	Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik aus dem Jahr 2007
OH-Lkw	Oberleitungshybrid-Lkw mit Pantograph und Verbrennungsmotor
ÖPFV	Öffentlicher Personenfernverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
öve	ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle (engl. für extern aufladbares Hybridelektrofahrzeug)
Pkm	Personenkilometer (Einheit der Verkehrsleistung im Personenverkehr)
Pkw	Personenkraftwagen
PtC	Power to Chemical
PtG	Power-to-Gas (hier: auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige Kraftstoffe; z.B. Wasserstoff oder Methan)
PtL	Power-to-Liquid (hier: auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte Flüssigkraftstoffe).
PtS	Power to Solid
RED-II	Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). Sogenannte Erneuerbare-Energien-Richtlinie.
RH	Reihenhäuser
SF6	Schwefelhexafluorid
tkm	Tonnenkilometer (Einheit der Verkehrsleistung im Güterverkehr)
TWh	Terrawattstunden
UBA	Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

APV	LAGA-Ausschuss für Produktverantwortung; FV
UNFCCC	Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen
URMOD	Umweltökonomischen Rohstoffmodell (zusammen vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH und Sustainable Solutions Germany entwickelt)
v. H.	Von Hundert
VdF	Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V., Bonn
VDM	Verband Deutscher Mineralbrunnen e.V., Bonn
VerpackV	Verpackungsverordnung
VOC	flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds)
wafg	Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke e.V., Berlin
WP	Wärmepumpe
WSB	Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“
zGG	zulässiges Gesamtgewicht



## Zusammenfassung

### Aktuelle Herausforderungen

**Die globalen Treibhausgasemissionen steigen trotz wachsender Klimaschutzmaßnahmen, so lagen 2017 die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit mit 37 Gigatonnen (Gt) rund 63 % über denen von 1990.** Hauptverursacher ist dabei die Nutzung fossiler Energieträger, die gleichfalls wesentlich zur Primärrohstoffinanspruchnahme beitragen. So führt der Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre zu einem Anstieg der globalen Jahresmitteltemperatur. Im Jahr 2016 waren im Mittel die Temperaturen um 1,1 °C höher als im vorindustriellen Zeitalter. **Die Folgen wirken auf alle natürlichen Ökosysteme und betreffen auch die Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen wie Fläche und Wasser, sowie die biologische Vielfalt.**

Auch die Nutzung der natürlichen Ressourcen steigt menschenverursacht kontinuierlich an und führt auf Dauer zu einem Überschreiten der planetaren Grenzen. **So ist die Rohstoffinanspruchnahme (Biomasse, fossile Energieträger, Metalle und nichtmetallische Mineralien) von sechs Gt im Jahr 1900 um das Fünzfache auf rund 92 Gt in 2017 gestiegen (UNEP, 2019b).** Bei einer steigenden Weltbevölkerung könnte bis zum Jahr 2050 die Nachfrage nach Rohstoffen auf über 180 Gt ansteigen (Hatfield-Dodds et al., 2017). Der Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen verursacht momentan rund die Hälfte der weltweiten Treibhausgasemissionen sowie mehr als 90 % des weltweiten Artensterbens und der Wasserknappheit (UNEP, 2019b).

Um den Herausforderungen entgegen zu treten hat sich die Bundesregierung verschiedene Klima- und Umweltziele gesetzt. Mit der Ratifizierung des Übereinkommens von Paris ist Deutschland strenge internationale Verpflichtungen eingegangen. **Mit den derzeitigen Politiken sind jedoch ambitionierte Klima- und Umweltziele nicht realisierbar. Es erfordert ein deutliches und schnelles Handeln. So ist eine grundlegende Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung, die auch die erforderlichen Anpassungen an den sich bereits vollziehenden Klimawandel berücksichtigt, dringend erforderlich. Dabei sind alle Bereiche unseres täglichen Handelns und Wirtschaftens sowie deren Wechselwirkungen untereinander betroffen.**

### Lösungsraum aufzeigen

Vor diesem Hintergrund wurden in der vorliegenden **RESCUE-Studie**<sup>5</sup> sechs verschiedene Szenarien zur Beschreibung der Lösungs- und Handlungsspielräume für den Weg in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität in Deutschland betrachtet. Die Szenarien zeichnen dabei mögliche Transformationspfade Deutschlands hin zu einer Treibhausgasneutralität auf. Dabei wird Deutschland nicht isoliert betrachtet, sondern – eingebettet in die Europäische Union und die Welt, als produzierender Industriestandort im globalen Handel mit einer modernen leistungsfähigen Gesellschaft. Klimaschutz, Dekarbonisierung, Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis charakterisieren den erforderlichen gesellschaftlichen und industriellen Wandel. Allen Szenarien ist gemeinsam, dass sie für Deutschland eine Treibhausgasminderung bis 2050 von mindestens 95 % und bis 2030 mindestens 55 % gegenüber 1990 vorsehen. Dabei wird bei den entwickelten Treibhausgasminderungsstrategien jeweils ein Mix aus Vermeidung, Substitution und der Nutzung von natürlichen Senken verfolgt.

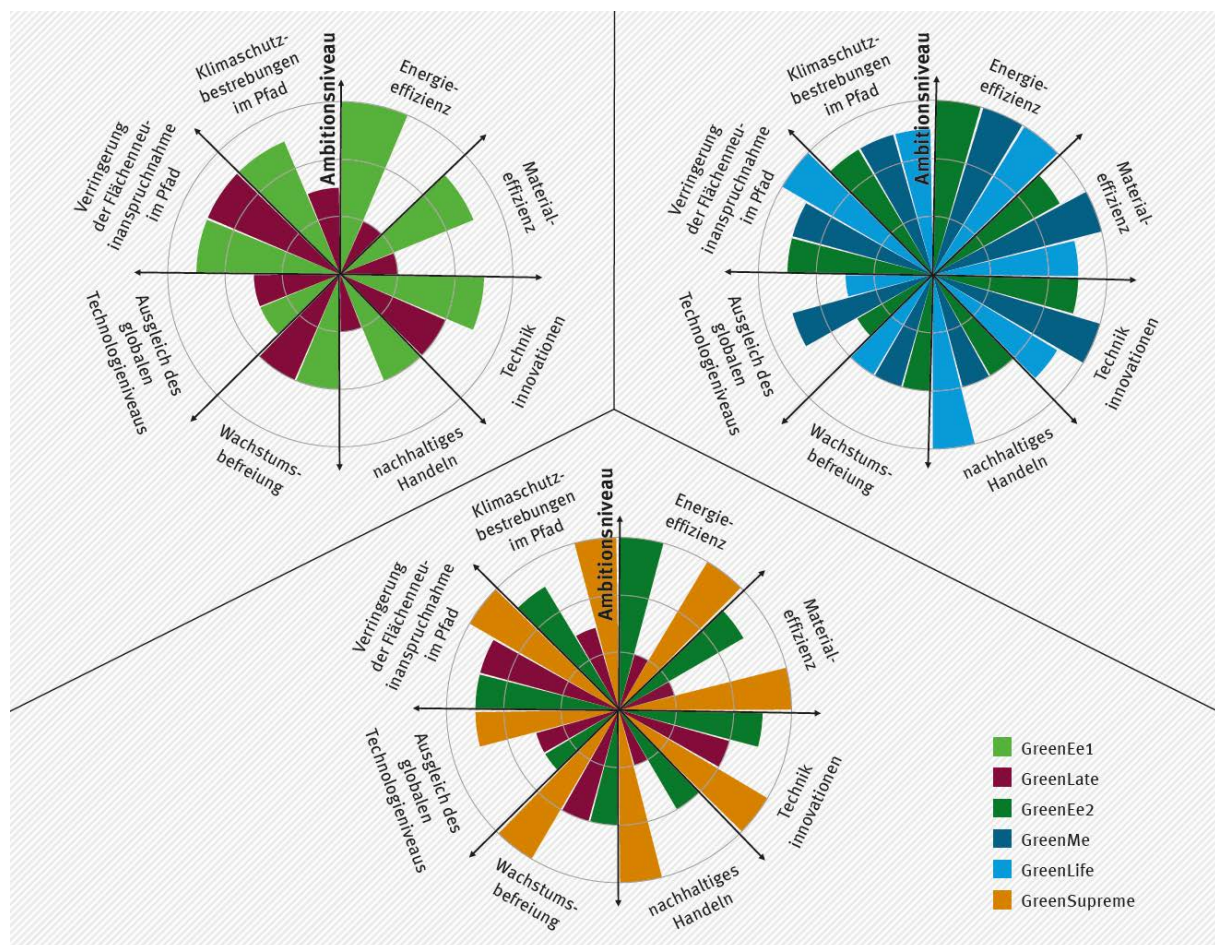
---

<sup>5</sup> Ressourceneffiziente Wege in eine Treibhausgasneutralität (RESCUE).



Zum Überblick sind die charakteristischen Eigenschaften der sechs Szenarien in Abbildung 0-1 zusammenfassend dargestellt.

**Abbildung 0-1: Überblick über die charakteristischen Einflussfaktoren der Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung

Die Szenarien **GreenEe1** und **GreenLate** charakterisieren insgesamt steigende Produktionskapazitäten und weiterhin eine auf Exporte orientierte Produktion in Deutschland. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich im Ambitionsniveau zur Treibhausgasminderung im Transformationspfad sowie zur Energie- und Materialeffizienzsteigerung. So werden in **GreenLate** auch langfristig konventionelle Techniken, wie Verbrennungsmotoren im Schwerlasttransport oder Gasverbrennungstechniken, eingesetzt und die systemisch energetisch effizienten Techniken, wie Elektromobilität und Power to Heat, sind weniger integriert.

Wesentliches Charakteristikum von **GreenLate** ist auch, dass zwar 2030 eine Treibhausgasminderung um 55 % gegenüber 1990 erreicht wird, aber erst in der Dekade nach 2040 nochmal eine deutliche Steigerung der Klimaschutzmaßnahmen und Technikinnovationen erfolgt, um die Treibhausgasminderung um mindestens 95 % bis 2050 sicher zu erreichen. **GreenLate** stellt damit ein Szenario der geringen „Elektrifizierung“ und des „verspäteten Handelns“ bei Innovationen und Umsetzung dar. Bezüglich der Treibhausgasminderung liegt **GreenLate** am ambitionierten Rand des Zielkorridors der Bundesregierung, also Minderung um 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und 95 % bis 2050.



Bei einer ausgeglicheneren Handelsbilanz werden in **GreenEe2, GreenMe und GreenLife**, die Einflüsse technischer Klimaschutz- und Rohstoffeffizienzmaßnahmen sowie Änderungen der Lebensweise auf den möglichen Transformationspfad dargestellt.

**GreenEe2** fokussiert wie **GreenEe1** auf hohe technische Innovationen, Integration effizienter Stuktorkopplungstechniken und dem Heben von Energieeffizienzpotentialen.

Im **GreenMe**-Szenario wird davon ausgegangen, dass sich das Technikniveau der Welt durch Wissens- und Technologietransfer schnell entwickelt und im Jahr 2050 dem Stand in Deutschland und Europa entspricht. In den anderen Szenarien wird hingegen davon ausgegangen, dass das Technikniveau sich global zwar deutlich angleicht aber dennoch im Jahr 2050 etwa 10 Jahre Unterschied zwischen Entwicklungs- und heutigen Industrieländern besteht. Zu dem hohen Ambitionsniveau bei der Energieeffizienz kommt in GreenMe eine weitere Steigerung der Materialeffizienz und Rohstoffeinsparung. GreenLife charakterisiert deutlich nachhaltigeres Handeln in der Gesellschaft, zum Beispiel eine gesündere Ernährung und Konsum reparaturfähiger und rohstoffsparender Produkte.

Das **GreenSupreme**-Szenario vereinigt alle vorteilhaften Innovationen, technischen Maßnahmen sowie Lebensweisen. Zusätzlich erfolgt die Integration und Umsetzung dieser Maßnahmen deutlich schneller als in den anderen Szenarien, um so die kumulierten Emissionen zu reduzieren und einen für den internationalen Klimaschutz wichtigen Beitrag zu gewährleisten. So wird nicht nur kurzfristig der Ausstieg aus der Kohleverstromung, sondern auch der Ausstieg der generellen Kohlenutzung eingeleitet. 2030 erfolgt bereits keine Verstromung von Kohle mehr und bis 2040 ist der vollständige Ausstieg aus der Kohlenutzung realisiert. Auch wird im Unterschied zu allen anderen Szenarien eine stärkere Wachstumsbefreiung<sup>6</sup> der Gesamtwirtschaft angenommen.

### Ergebnisse - Klimaschutz

Die Green-Szenarien fokussieren auf Treibhausgasneutralität bis 2050 oder kommen dieser nahe und spannen einen Lösungsraum über alle Emissionsquellgruppen auf. **Trotz der Verfehlung einzelner sektoraler Ziele des aktuellen Klimaschutzplans ist das Gesamtminderungsziel bis 2030 in allen Green-Szenarien sicher gewährleistet, insbesondere durch einen ambitionierten Umbau der Energiewirtschaft.** Als einziges Szenario bleibt das GreenLate-Szenario mit einer Minderung um 55 % gegenüber 1990 bis 2030 im Zielbereich des Klimaschutzplans. Die anderen Szenarien gehen deutlich darüber hinaus. GreenEe1 erreicht 60,3 % und GreenEe2, GreenMe sowie GreenLife liegen dabei in einem engen Bereich von 61,4 bis 62,6 % Treibhausgasminderung gegenüber 1990. GreenSupreme weist mit dem Anspruch einer schnellen Treibhausgasminderung, bereits 2030 eine Reduktion von 69 % auf. **Dominiert werden die Minderungen bis 2030 durch den eingeleiteten Ausstieg und in GreenSupreme den vollzogenen Ausstieg aus der Kohlenutzung zur Stromversorgung. Das sektorale KSP-Ziel für die Energiewirtschaft wird in allen Green-Szenarien 2030 sicher erreicht und übertroffen. Auch die sektoralen Ziele in der Industrie und Landwirtschaft werden in allen Szenarien sicher eingehalten. Bei einem Ausstieg aus der energetischen Biomassenutzung und einem schnellen Verzicht auf dezentrale Biomasseheizungsanlagen kann das Ziel im Gebäudesektor aber nur in GreenSupreme erreicht werden.** Bis spätestens 2035 erreichen aber alle Szenarien auch mit dem Ausstiegspfad aus der dezentralen Biomassenutzung die sektoralen Treibhausgasminderungen für 2030.

---

<sup>6</sup> In GreenSupreme findet ab 2030 in Deutschland, wie im heutigen Japan, zwar ein durchschnittliches Null-Wachstum der Gesamtwirtschaft statt, aber dennoch steigt das Pro-Kopf Bruttoinlandsprodukt im Vergleich zu heute weiter an.

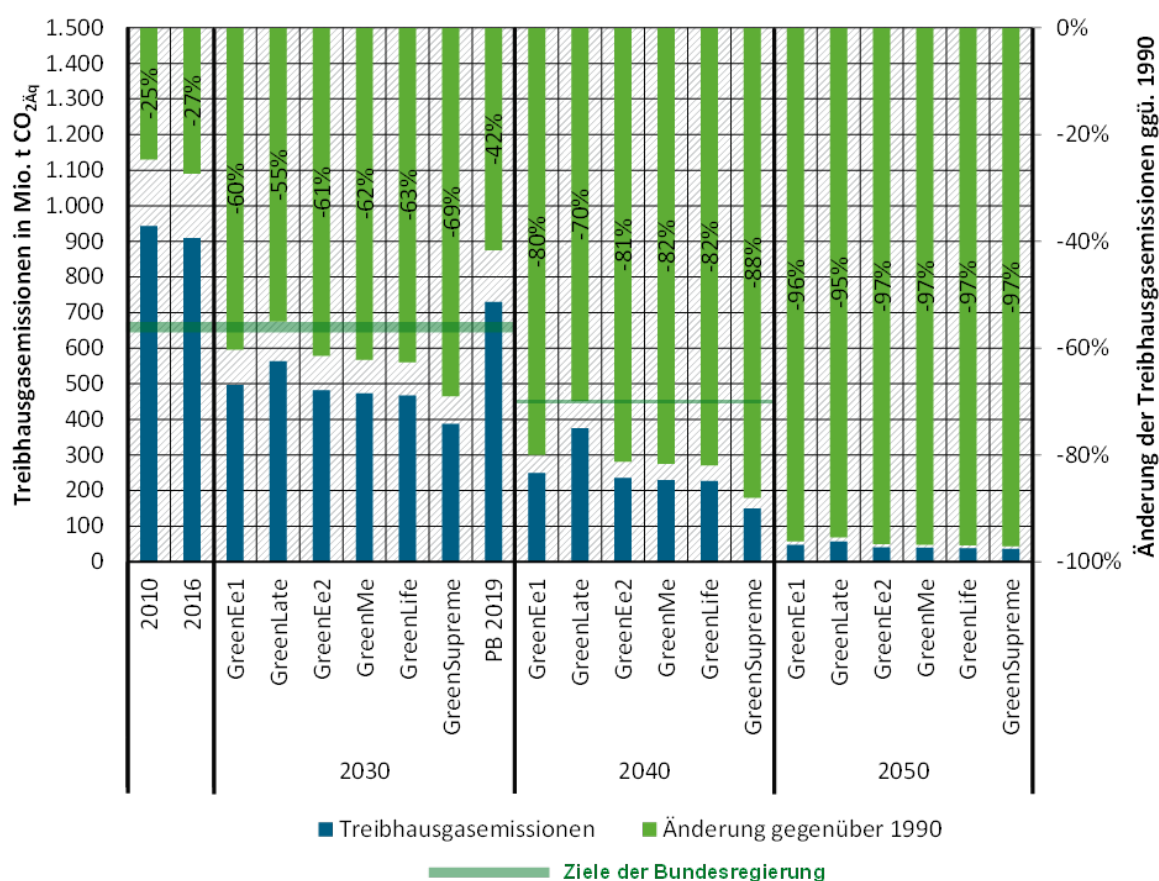
Das GreenLate verfehlt im Sektor Verkehr bis 2030 deutlich das sektorale Klimaschutzziel. Die GreenEe-Szenarien verfehlen nur knapp das sektorale Ziel im Verkehr, während GreenMe es sicher erreicht. **GreenLife übertrifft mit 42 % und GreenSupreme mit einer Minderung von 51 % sogar die sektoralen Zielvorgaben des Klimaschutzplans in 2030. Insgesamt wird deutlich, dass ein gesteigertes Minderungsniveau gegenüber den Zielen der Bundesregierung zwar unter hohen Anstrengungen, aber dennoch erreichbar und möglich ist.** Deutschland sollte daher diese hohen Minderungsbeiträge auch anstreben.

**Unter Berücksichtigung der auf die Ziele der Bundesregierung anrechenbaren Treibhausgasemissionen erreichen die Green-Szenarien Minderungen bis 2050 von 95,4 % in GreenLate bis hin zu 97,1 % in GreenSupreme, siehe Abbildung 0-2. Dabei werden die energiebedingten Treibhausgasemissionen vollständig vermieden. Die gesamte Energieversorgung, also Strom-, Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung<sup>7</sup>, basieren vollständig auf erneuerbaren Energien.** Trotz fleischärmerer Ernährung und Reduktion der Tierbestandzahlen in Deutschland, und der damit verbundenen deutlichen Reduktion der Treibhausgasemissionen werden weiterhin Treibhausgase in der Landwirtschaft verursacht. Diese tragen zu 60 bis 67 % zu den verbleibenden Emissionen in 2050 bei. Auch in der Industrie können nach heutigem Kenntnisstand nicht alle rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen vermieden werden. Im Jahr 2050 stammen noch zwischen 27 % (GreenSupreme) und 37 % (GreenLate) der Treibhausgasemissionen aus der Industrie. Hauptverursacher sind die Zement-, Kalk- und Glasindustrie.

---

<sup>7</sup> Hier ist der nicht-energetische Bedarf der chemischen Industrie gemeint.

Abbildung 0-2: Minderungen der Green-Szenarien bis 2050



Hinweis: es werden nur die Treibhausgasemissionen dargestellt, die in den Zielen der Bundesregierung berücksichtigt werden.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

Die Szenarien zeigen, dass unterschiedliche Pfade zur Treibhausgasneutralität führen und damit im Laufe des Transformationspfades auch unterschiedliche Treibhausgasemissionen in Summe anfallen können. Im GreenSupreme Szenario werden bis 2050 noch einmal knapp die Hälfte der seit 1990 bis 2015 emittierten Treibhausgasemissionen emittiert.

**Insbesondere durch einen schnellen Ausstieg aus der Kohlenutzung, auch über die Stromversorgung hinaus, können die kumulierten Treibhausgasemissionen begrenzt werden. Die Auswirkungen eines verzögerten Handelns werden im GreenLate Szenario deutlich.** Zwar wird die Treibhausgasneutralität auch in diesem Szenario annähernd erreicht, aber auf dem Weg dahin werden bis 2050 insgesamt etwa 37 % mehr Treibhausgasemissionen als im GreenSupreme Szenario ausgestoßen. Alle anderen Green-Szenarien stoßen bereits vor 2040 so viele Treibhausgasemissionen aus, wie GreenSupreme aufsummiert bis 2050 emittiert. **Damit wird deutlich, dass zur Begrenzung der kumulierten Treibhausgasemissionen eine geringe Verschärfung** (ähnlich wie in GreenEe, GreenMe oder GreenLife erreicht wird – rund 60-63 %) **der Zwischenziele 2030 nur im begrenzten Maße Wirkung hat. Es bedarf vielmehr seines schnellen und deutlich ambitionierteren Handelns.**

Weiterhin ist zu bedenken, dass die Treibhausgasemissionen, welche auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden, nur einen Teil der national verursachten Emissionen darstellen. Im Bereich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen, Waldbewirtschaftung

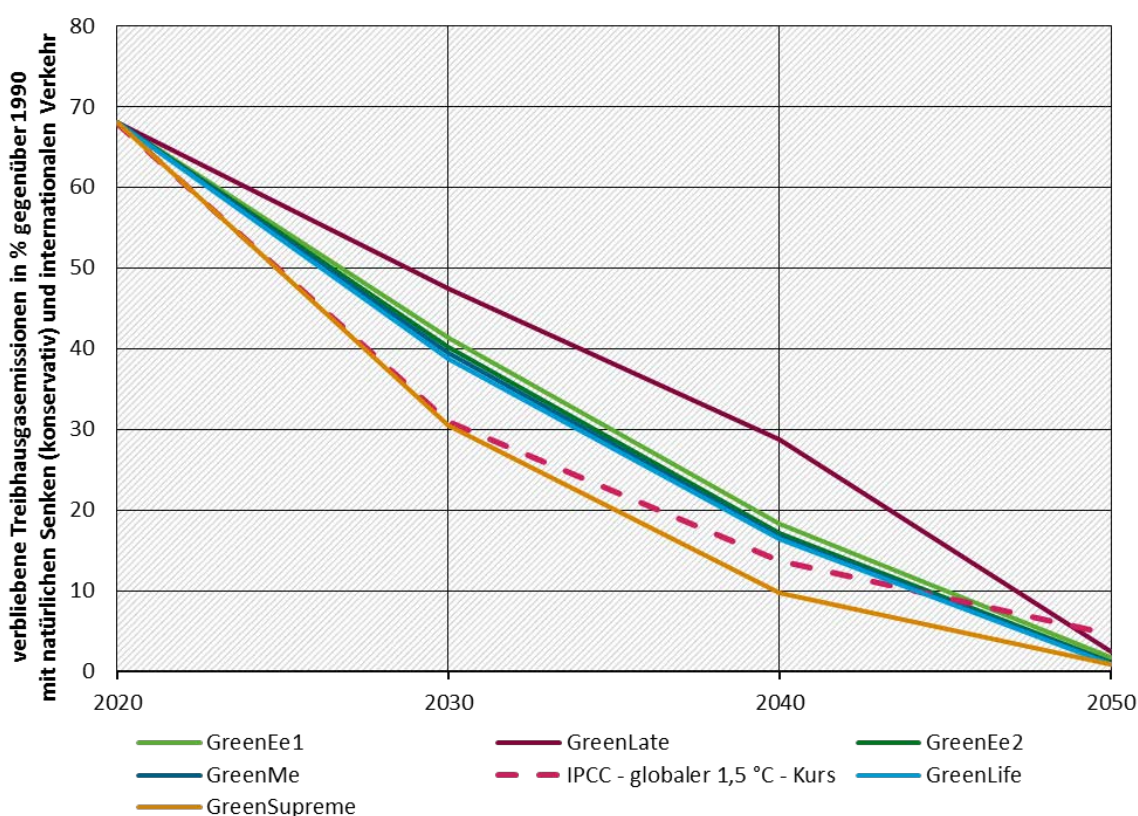
und durch die national verursachten internationalen Verkehre, entstehende Treibhausgasemissionen sind gleichfalls zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung sind dabei auch die natürlichen Senken in Verbindung mit einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung, Holznutzung und Flächennutzung. Mit dem Verzicht der energetischen Nutzung von Waldrestholz, mit den freiwerdenden Flächen durch Verzicht auf den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung, mit den freiwerdenden landwirtschaftlichen Flächen durch Reduktion der Tierbestandzahlen wird ergänzend zur Waldbewirtschaftung die natürliche Kohlenstoffs Senke gestärkt. In der vorliegenden Studie erfolgten allerdings keine Ökosystemberechnungen, so dass nur näherungsweise der Minderungsbeitrag ermittelt werden konnte. Aus der Literatur wurde hierfür ein Korridor unter konservativen und unter optimistischen Annahmen für die Green-Szenarien aufgespannt. **Die Szenarien zeigen, dass für einen erfolgreichen Klimaschutz die Nutzung von Senken unausweichlich ist. Sie stellen jedoch keinen Ersatz für Substitution und Vermeidung von Treibhausgasemissionen dar.** Natürliche Senken, also nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung, bieten schon heute die Möglichkeit einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre. **In den ambitionierten Szenarien GreenLife und GreenSupreme können Netto-Null-Emissionen 2050 sicher erreicht werden** und selbst GreenLate kann diesem Anspruch nahekommen. **Für die Erreichung nationaler Treibhausgasneutralität ist somit kein CCS erforderlich, sondern vielmehr das Stärken natürlicher Senken. Gleichzeitig können so Synergien zu anderen Umweltherausforderungen, wie dem Biodiversitätsschutz, erschlossen werden.** Gleichwohl sind auch die Erforschung und Umsetzung treibhausgasextensiver Energie- und Industrietechniken dringend erforderlich.

**Den internationalen Verpflichtungen am nächsten kommt das GreenSupreme-Szenario.** Die Entwicklung der Szenarien im Vergleich zu einem Durchschnittspfad (IPCC-globaler 1,5 °C-Kurs (IIASA, 2019b), der auf unterschiedlicher globalen 1,5 °C-Pfaden basiert, sind in Abbildung 0-3 zu sehen. Der IPCC-globale 1,5 °C-Kurs stellt einen durchschnittlichen Transformationspfad dar, auf den sich in Summe die Weltgemeinschaft ungefähr bewegen muss. Er bedeutet nicht, dass jede einzelne Nation exakt diesen Pfad einhalten muss. Vor dem Hintergrund, dass der Wohlstand und die Wirtschaftsleistung Deutschlands auf treibhausgasintensiven Techniken und der Nutzung fossiler Energieträger beruht, sollte Deutschland einen entsprechend ambitionierten Beitrag zur Begrenzung der menschenverursachten Treibhausgasemissionen leisten. **Es ist erkenntlich, dass selbst die hohen Ambitionsannahmen in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife nicht den Anforderungen dieses durchschnittlichen globalen 1,5 °C-Kurses nach IPCC genügen. GreenLate, welches auch die Ziele der Bundesregierung darstellt, wird den internationalen Verpflichtungen durch die nationalen Bestrebungen nicht gerecht.** Es ist zu beachten, dass dieser globale 1,5 °C-Kurs jedoch in keiner Weise Erwägungen zu Fragen der globalen Gerechtigkeit abbildet. In der Literatur zeigen Studien z. B. (Climate Analytics, 2018; Höhne et al., 2019), dass unter Gerechtigkeitsaspekten Deutschland bereits vor 2035 Treibhausgasneutralität erreichen müsste. **Um einem global angemessenen Beitrag Deutschlands so nah wie möglich zu kommen, sind über der umfassenden und schnellen Umsetzung von nationalen Klimaschutzmaßnahmen – wie in GreenSupreme dargestellt - hinaus eine ambitionierte internationale Kooperation, Finanzierung und Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen außerhalb Deutschlands notwendig.**



Nicht zu vernachlässigen sind auch weitere klimarelevante Emissionen, die durch den Menschen verursacht werden, welche derzeit aus wissenschaftlicher Perspektive noch nicht genau quantifiziert werden können, bspw. die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte im Luftverkehr. Daher ist allein aus dem Vorsorgeprinzip ein schnelles Handeln in allen Bereichen erforderlich, um annähernd den globalen Herausforderungen für die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C gerecht zu werden. Für eine Entwicklung, die sich am Übereinkommen von Paris orientiert, sind die nationalen Treibhausgasemissionen bereits bis 2030 gegenüber 1990 um rund 70 % zu mindern.

**Abbildung 0-3: Entwicklung der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien unter Berücksichtigung von LULUCF (konservativ) und den CO<sub>2</sub>-Emissionen der international verursachten Verkehre**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (IIASA, 2019b)

### Ergebnisse - Ressourcenschonung

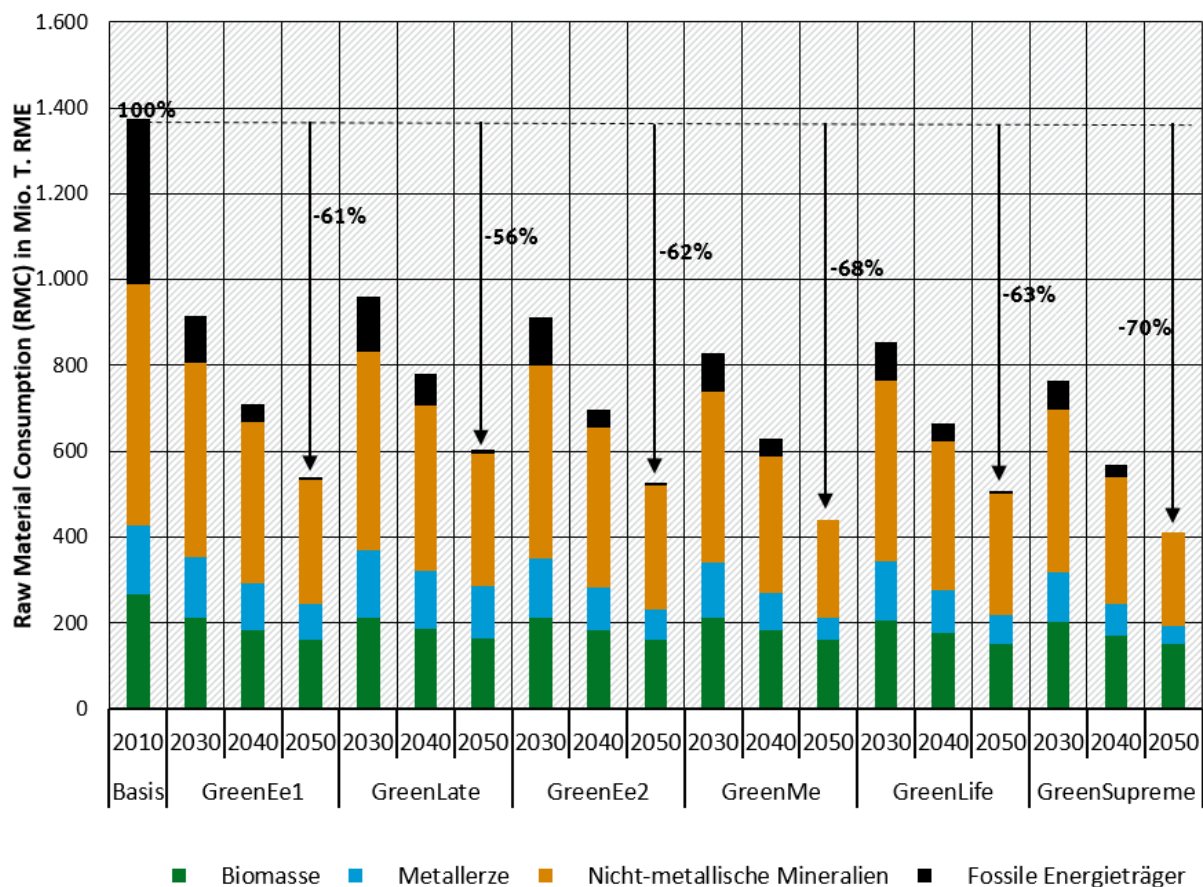
Die Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland hat erhebliche Auswirkungen auf Deutschlands **Rohstoffinanspruchnahme** (Biomasse, fossile Energieträger, nicht-metallische Mineralien und Metalle). Dies wird in der RESCUE-Studie schwerpunktmäßig durch den **Indikator RMC (Raw Material Consumption)**<sup>8</sup> betrachtet, **welcher die Primärrohstoffnutzung für den inländischen Konsum und die Investitionen („Primärrohstoffkonsum“) abbildet**. Wichtige Faktoren zur Reduktion des RMC umfassen u. a. die vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbaren Energien und dem damit

<sup>8</sup> RMC (Raw Material Consumption) setzt sich zusammen aus der inländischen Rohstoffentnahme und den Importen abzüglich der Rohstoffe, die für die Herstellung exportierter Güter verwendet werden. Um die indirekten Importe („Rohstoff-Äquivalente“ (engl. „Raw Material Equivalents“ (RME))) zu berechnen, werden die Input-Output-Tabellen des URMOD-Modells inkl. Daten zu Im- und Exporten der deutschen Volkswirtschaft herangezogen. RME berücksichtigen alle Rohstoffe, die im In- und Ausland zur Erzeugung der Güter genutzt wurden.

verbundenen Wegfall der Nachfrage nach fossilen Energieträgern. Weitere wichtige Faktoren die Reduktion der Ausweisung von Siedlungsflächen, Energieeinsparungen, der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen, die Optimierung von Verarbeitungsprozessen durch Materialsubstitutionen und Materialeffizienzsteigerungen sowie Lebensstiländerungen. In allen Szenarien wird eine Erhöhung der Materialeffizienz und Entwicklung des technologischen Stands in und außerhalb Europas angenommen.

Im Ausgangsjahr 2010 liegt Deutschlands Primärrohstoffkonsum (RMC) inklusive Vorleistungen im Ausland bei 1,37 Mrd. t. und wird mengenmäßig dominiert durch nicht-metallische Mineralien und fossile Rohstoffe, wie in Abbildung 0-4 zu sehen ist.

**Abbildung 0-4: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffkategorien in den sechs Szenarien (2010 bis 2050), Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME)**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

**Mit dem Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger geht in allen Szenarien anteilig die größte Reduktion des Rohstoffbedarfs einher.** Bereits im **GreenLate**-Szenario finden – mit einer Verzögerung im Vergleich zu den anderen Szenarien – eine kontinuierliche Fortsetzung einer ambitionierten Ressourcenschonungspolitik inkl. eines verstärkten Einsatzes von Sekundärrohstoffen und Materialsubstitution sowie erste Umstellungen hin zu nachhaltigeren Lebensstilen<sup>9</sup> statt. Dies führt bereits zu einem **Rückgang im RMC bis 2050 um -56 % im Vergleich zu 2010.**

<sup>9</sup> Da im GreenLate-Szenario der Fokus auf technischen Maßnahmen liegt, sind nur einige Aspekte nachhaltigerer Lebensstile in diesem Szenario einbezogen, insbesondere die Reduktion des Fleischkonsums und die Ansätze zur Verkehrswende durch

In den beiden **GreenEe-Szenarien** findet mit einem Fokus auf Energieeffizienz und ergänzt um weitere Aspekte nachhaltiger Lebensstile<sup>10</sup>, ein **Rückgang im RMC um rund 61 bis 62 % bis 2050** statt. **Zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz (GreenMe) haben das Potential, den Materialkonsum um insgesamt -68 % zu senken.** Dies beinhalten u. a. die Ausschöpfung des ökologisch-technischen Recyclingpotenzials, eine deutlich ausgeprägtere Materialsubstitution im Vergleich zu GreenLate, den Einsatz innovativer Materialien wie Textilbeton sowie verstärkter Holzbau. Zusätzlich wird angenommen, dass auch global zusätzliche Anstrengungen zur Erhöhung der Materialeffizienz analog zu Deutschland getroffen werden und sich somit auch in den mit den Importen verbundenen Produkten eine ambitionierte Ressourcenschonungspolitik niederschlägt.

**Darüberhinausgehende Lebensstiländerungen** wie raumeffizientes Bauen und damit einhergehend eine gegenüber heute reduzierte Pro-Kopf-Wohnfläche, die Bevorzugung langlebiger und reparaturfähiger Produkte sowie die hauptsächliche Nutzung von Gütern im Rahmen von Sharingangeboten (**GreenLife**) **führen zu einer Reduktion des RMC um -63 % im Vergleich zu 2010.** Weiterhin wird im **GreenSupreme-Szenario durch einen schnelleren und noch ambitionierteren Umbau des Energiesystems verbunden mit einer Befreiung vom Wirtschaftswachstum, eine Reduktion des Materialkonsums um -70 % bis 2050 erreicht.**

Die kontinuierliche Abnahme des RMC führt trotz der Annahme eines weiteren Wirtschaftswachstums von jährlich 0,7 % (alle Szenarien bis auf GreenSupreme ab 2030<sup>11</sup>) zu einer **Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität<sup>12</sup>, welche mit durchschnittlich 2,3 % bis 3,0 % pro Jahr über alle Szenarien hinweg über den Zielvorgaben beispielsweise von ProgRess II (BMUB, 2016) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung, 2018a) liegt.**

Der Einsatz von nichtmetallischen Mineralien (Sand, Kies, Kalkstein, etc.) sinkt in allen Szenarien bis 2050. Insbesondere die Annahmen zur Entwicklung der Wohnfläche und die Erreichung des Ziels der Bundesregierung zur Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungen und Verkehr auf 0 ha/Tag bis 2050 (BMU, 2016b) führen in allen Green-Szenarien zu einer Reduktion des Bedarfs an nicht-metallischen Mineralien. Ebenso sind die szenariospezifischen Annahmen zum Sekundärrohstoffeinsatz, zur Materialsubstitution (z. B. verstärkter Holzeinsatz und Textilbeton in GreenMe und GreenSupreme) und der Materialeffizienzsteigerung von Bedeutung.

Umstellungen der Ernährung, insbesondere der verringerte Fleischkonsum in Verbindung mit einem reduzierten Tierbestand sowie eine leichte Abnahme der Bevölkerung und der Verzicht auf den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung nach 2030 tragen wesentlich zum Rückgang der **Biomassenutzung** bis 2050 bei. Umgekehrt erhöhen die Annahmen zum zunehmenden Holzbau in allen Green-Szenarien außer GreenLate sowie die Substitution von abiotischen Materialien vor allem durch Holz (z. B. Dämmstoffe und Masten für Stromleitungen)

---

Vermeidung und Verlagerung. Diese finden allerdings aufgrund einer späteren Umstellung zeitverzögert im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien statt.

<sup>10</sup> Hierzu zählt beispielsweise auch die im Vergleich zu GreenLate geringere Wohnfläche oder eine stärkere Änderung des persönlichen Mobilitätsverhaltens.

<sup>11</sup> In GreenSupreme erfolgt im Wesentlichen ein qualitatives Wachstum einzelner Branchen und Sektoren. Dieses wird aber durch rückläufige Entwicklungen in anderen Bereichen kompensiert. Das bedeutet, dass ab 2030 zwar ein durchschnittliches Null-Wachstum der Gesamtwirtschaft erfolgt, aber dennoch das Pro-Kopf Bruttoinlandsprodukt im Vergleich zu heute weiter ansteigt.

<sup>12</sup> Die Gesamtrohstoffproduktivität ist definiert als preisbereinigtes Bruttoinlandsprodukt zuzüglich der preisbereinigten Ausgaben für Importe (BIP+M) geteilt durch die Masse der inländischen genutzten Entnahme von Rohstoffen zuzüglich der Masse der Importe ausgedrückt in Rohstoffäquivalenten (RME). Die Gesamtrohstoffproduktivität umfasst abiotische und biotische Rohstoffe. Sie dient als produktionsbezogener Indikator für die Rohstoffeffizienz der deutschen Volkswirtschaft.



den Biomassebedarf, insbesondere in den Szenarien GreenMe und GreenSupreme. Dieser Effekt nimmt jedoch aufgrund der unterstellten Wohnflächenentwicklungen und den damit verbundenen Neubau- und Abrissaktivitäten nach 2030 kontinuierlich ab.

Die Inanspruchnahme von **Metallerzen** insgesamt nimmt durch den Mehrbedarf für den Umbau der Volkswirtschaft bis 2030 nur um rund -4 % bis -29 % ab, wohingegen 2040 bereits eine Reduktion um -16 % bis -53 % erreicht wird. Im GreenLate Szenario verzögert sich der Umbau und nimmt erst nach 2030 Fahrt auf. Allerdings ist der in den Green-Szenarien beschriebene Umbau der deutschen Volkswirtschaft auch mit einer zwischenzeitlichen Mehrinanspruchnahme einzelner Rohstoffe wie z. B. Lithium oder Kupfer verbunden. Vor dem Hintergrund einer global gerechten Rohstoffnutzung sollte deshalb ein möglichst ambitionierter Transformationspfad analog GreenSupreme verfolgt werden.

### **Fazit**

Es ist offenkundig, dass sowohl **aus Klima- als auch Ressourcenschutzgründen auf die Nutzung aller fossilen Energieträger bis spätestens 2050 verzichtet werden sollte. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung sollte bis 2030 und der vollständige Ausstieg aus der Kohlenutzung (also auch Wärme und Rohstoff) sollte bis spätestens 2040 erfolgen, um einem global angemessenen Beitrag Deutschlands so nah wie möglich zu kommen.** Die erforderlichen technologischen Entwicklungen, Infrastrukturen sind in allen Bereichen unverzüglich anzugehen, dabei sind **Energie- und Materialeffizienz gleichberechtigte Kriterien**. Auch müssen die Rahmenbedingungen geschaffen werden, dass ein **gesellschaftliches Umdenken** hin zu einem umweltbewussteren Handeln sowohl bei der Nachfrage als auch beim Angebot generiert wird.

**Wenn gleich aktuelle Trends, politische Entscheidungen und gesellschaftliche Diskussionen die RESCUE-Studie ambitioniert erscheinen lassen, zeigt sie, dass Treibhausgasneutralität in Deutschland und das Erreichen eines nachhaltigen Niveaus der Primärrohstoffinanspruchnahme durch ambitioniertes Handeln möglich sind. Dabei stellt sich jedoch nicht mehr die Frage, ob und wann einzelne Beiträge erbracht werden sollen und Entwicklungen angegangen werden müssen. Vielmehr wird deutlich: Es muss jetzt gehandelt werden und jeder Beitrag, sowohl in Produktion als auch Konsum, ist wichtig! Die ambitionierten nationalen Ziele können dabei nur erreicht werden, wenn diese auch in entsprechende europäische und internationale Entwicklungen eingebettet sind und sich am Übereinkommen von Paris und der Agenda 2030 orientieren. Innerhalb der nächsten Jahre müssen hierfür global und national die richtigen Weichen gestellt werden!**

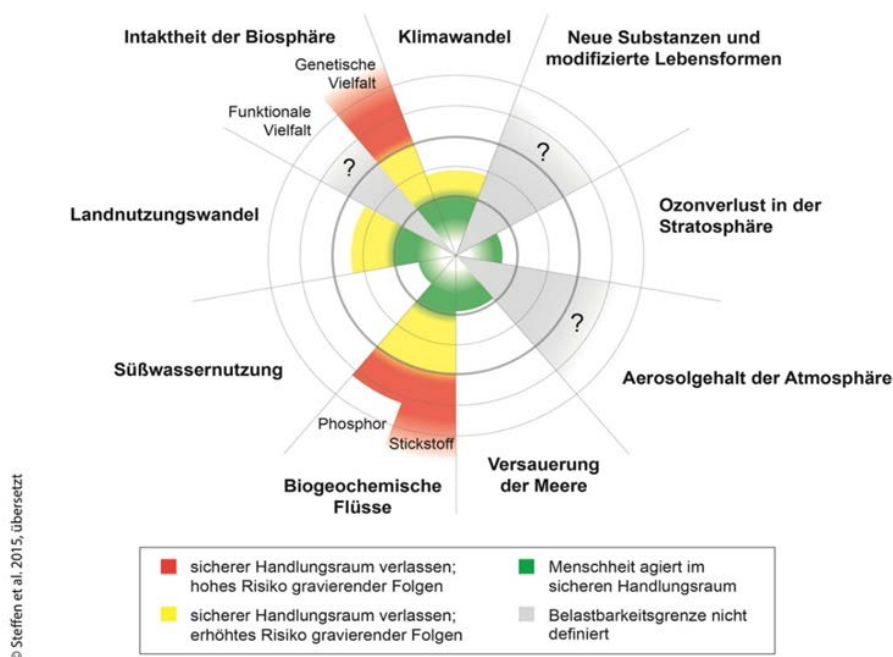


# 1 Einleitung

Wir befinden uns im Zeitalter des Anthropozäns, in dem der Mensch zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde geworden ist (Crutzen, 2006; Haber & Held, 2016; Steffen et al., 2015). Der Mensch gestaltet und verändert die Erdoberfläche und ihre ökologischen Systeme durch Bergbau, Siedlungs- und Infrastrukturmaßnahmen sowie Land- und Forstwirtschaft und beeinflusst damit die Entwicklung der natürlichen Ökosysteme. Ebenso verändert er durch sein Handeln und Wirtschaften die Zusammensetzung und Prozesse der Atmosphäre. Das bisherige globale Wachstum fußt auf der Nutzung natürlicher Ressourcen, wie fossiler Energieträger und anderer Rohstoffe, aber auch Land und Wasser. Diese Einflussnahmen bedrohen zunehmend unsere Umwelt: Das Klima erwärmt und verändert sich, fruchtbare Böden erodieren, Wasser verschmutzt, Biodiversität verringert sich und anthropogene Schadstoffe wirken sich schädlich auf Mensch und Umwelt aus. Dies sind nur einige der Folgen.

Bereits heute hat die Belastung der globalen Ökosysteme durch den Menschen ein Ausmaß erreicht, das die Kapazitäten des Erdsystems, sich selbst zu regulieren, in hohem Maße gefährdet. Dadurch entsteht die Gefahr, so genannte Kipppunkte (tipping points) anzustoßen, die die Ökosysteme aus ihrem bisherigen Gleichgewicht bringen und so verändern, dass sie irreversibel geschädigt sind oder schädigende Wirkung entfalten. Dies gilt insbesondere für das Klimasystem. (Steffen et al., 2015) priorisieren neun für das System Erde essentielle ökologische Dimensionen, sogenannte planetare Grenzen, und damit verbundene mögliche Grenzwerte, die für Stabilisierung der Ökosysteme eingehalten werden sollten. Die planetaren Grenzen beinhalten den Klimawandel, die Versauerung der Meere, den Ozonverlust in der Stratosphäre, die Intaktheit der Biosphäre, den Landnutzungswandel, die Süßwassernutzung, Biogeochemische Kreisläufe (Stickstoff- und Phosphorkreisläufe), den Aerosolgehalt der Atmosphäre und die Einbringung neuer Substanzen und modifizierter Lebensformen (Abbildung 1-1).

**Abbildung 1-1: Planetare Grenzen nach (Steffen et al., 2015)**



Quelle: (Steffen et al., 2015)

Nach (Steffen et al., 2015) werden vier der planetaren Belastungsgrenzen derzeit bereits überschritten (der Klimawandel, die Unversehrtheit der Biosphäre, Landnutzungswandel und biogeochemische Stoffströme). Zu den Ursachen gehören unter anderem die nicht nachhaltige Nutzung von Rohstoffen sowie die intensive Nutzung fossiler Energieträger.

Angetrieben durch die steigende Weltbevölkerung und die zunehmende Wirtschaftsleistung ist die globale Rohstoffinanspruchnahme (Mineralien, Erze, Biomasse und fossile Energieträger) von sechs Gigatonnen (Gt = Milliarden Tonnen) im Jahr 1900 um etwa das Fünffache auf rund 92 Gt in 2017 gestiegen (UNEP, 2019b), siehe Abbildung 1-2(a). Wegen einer steigenden Weltbevölkerung auf 10 Milliarden Menschen könnte sich bis zum Jahr 2050 die Nachfrage nach Rohstoffen nochmals verdoppeln, auf dann über 180 Gt (Hatfield-Dodds et al., 2017).

Rohstoffe, welche aus ihren natürlichen Lagerstätten entnommen wurden, werden in Infrastrukturen, Gebäude und Güter des täglichen Gebrauchs umgewandelt und verbleiben oft für lange Zeit im sogenannten anthropogenen Lager<sup>13</sup>. Dieses Materiallager nahm global von 35 Gt im Jahr 1900 auf 792 Gt im Jahr 2010 zu, und die Bestände dürften weiter steigen, was u. a. auf den großen Infrastruktur- und Gebäudebedarf in den Schwellenländern zurückzuführen ist (Fridolin Krausmann et al., 2017), siehe Abbildung 1-2(b). Durch das stetig anhaltende Wachstum des anthropogenen Lagers wird das Schließen von Stoffkreisläufen erschwert, da trotz verbesserter Recyclingraten weiterhin Primärrohstoffe benötigt werden. Der Beitrag der recycelten Materialien zu Rohstoffinputs lag im Jahr 2010 bei global nur rund 12 % (Fridolin Krausmann et al., 2017). Verbunden mit der Förderung, Weiterverarbeitung, Nutzung und Wiederverwertung sowie Entsorgung von Materialien ist auch ein Anstieg von dissipativen Verlusten<sup>14</sup>, Abfällen und Emissionen mit entsprechenden ökologischen Belastungen und Beeinträchtigungen. Darüber hinaus verstärkt die Nutzung von Rohstoffen und Materialien den Druck auf andere natürliche Ressourcen<sup>15</sup> wie Flächen, Wasser und die biologische Vielfalt.

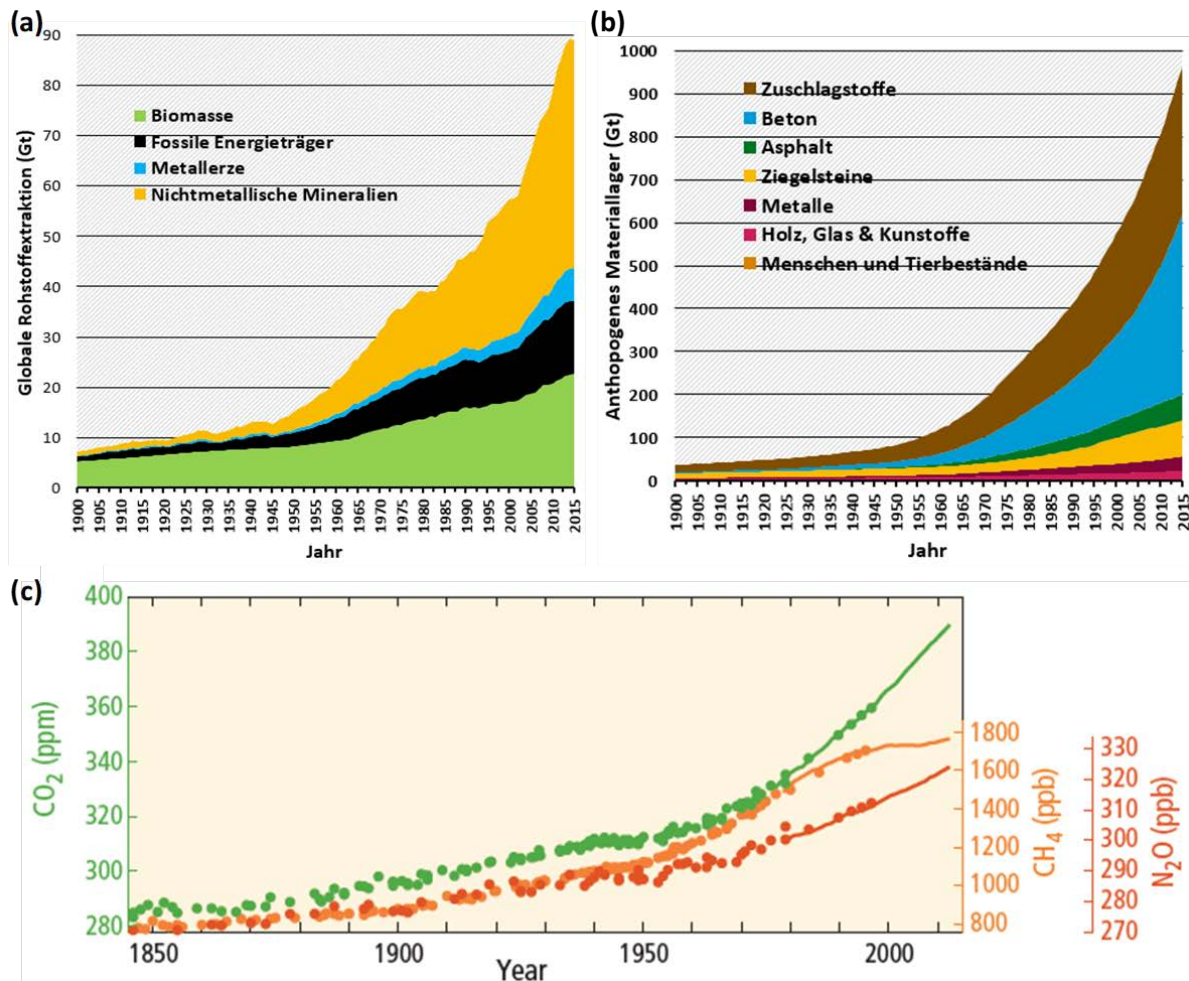
Die globalen anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen sind von 1970 bis 2015 von 27 Gt CO<sub>2</sub>-Äq auf 51 Gt CO<sub>2</sub>-Äq angestiegen (Climate Action Tracker, 2018) (Abbildung 1-2(c)). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger und industriellen Prozessen machten weltweit dabei einen Anteil von rund 78 % der gesamten Treibhausgasemissionen von 1970 bis 2010 aus. Dies ist verbunden mit einem Anstieg der weltweiten Jahresmitteltemperatur um 0,85 °C über den Zeitraum von 1880 bis 2012 (IPCC, 2014b). Die globale Durchschnittstemperatur lag 2018 ungefähr 0,79 °C über dem langjährigen Durchschnittswert des 20. Jahrhunderts und somit bei 14,7 °C, also etwa 1 °C über vorindustriellen Werten (UBA, 2017e). 2018 war somit das viertwärmste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn. Die zwanzig wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen liegen alle in der Periode von 1990 bis heute. Die fünf wärmsten Jahre überhaupt wurden seit 2014 aufgezeichnet.

---

<sup>13</sup> Rohstoffe werden aus ihren natürlichen Lagerstätten entnommen und zu Infrastrukturen, Gebäuden und Gütern des täglichen Gebrauchs umgewandelt. In dieser Form verbleiben sie oft lange Zeit in der Anthroposphäre, dem gesellschaftlichen, technologischen und kulturellen Wirkungsraum des Menschen. Sie bilden ein Materiallager, das in vielschichtigen Stoffwechselbeziehungen zu seiner Umgebung steht.

<sup>14</sup> Stoffverluste aufgrund feiner Verteilung, Beispiele: Korrosion von metallischen Bauteilen, Verwitterung von mineralischen Bauteilen, Reifen- und Bremsbelagabrieb, Stoffverluste beim Leiterplattenrecycling (UBA, 2012).

<sup>15</sup> Natürliche Ressourcen sind Mittel, die die Natur bereitstellt und die für den Menschen einen Nutzen stiften. Zu den natürlichen Ressourcen zählen die erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärrohstoffe, der physische Raum, die strömenden Ressourcen sowie die Umweltmedien, siehe VDI 4800-1 (VDI, 2018).

**Abbildung 1-2: Globale Rohstoffentnahme (a), Aufbau des anthropogenen Lagers (b) und global gemittelte Treibhausgasemissionen (c)**

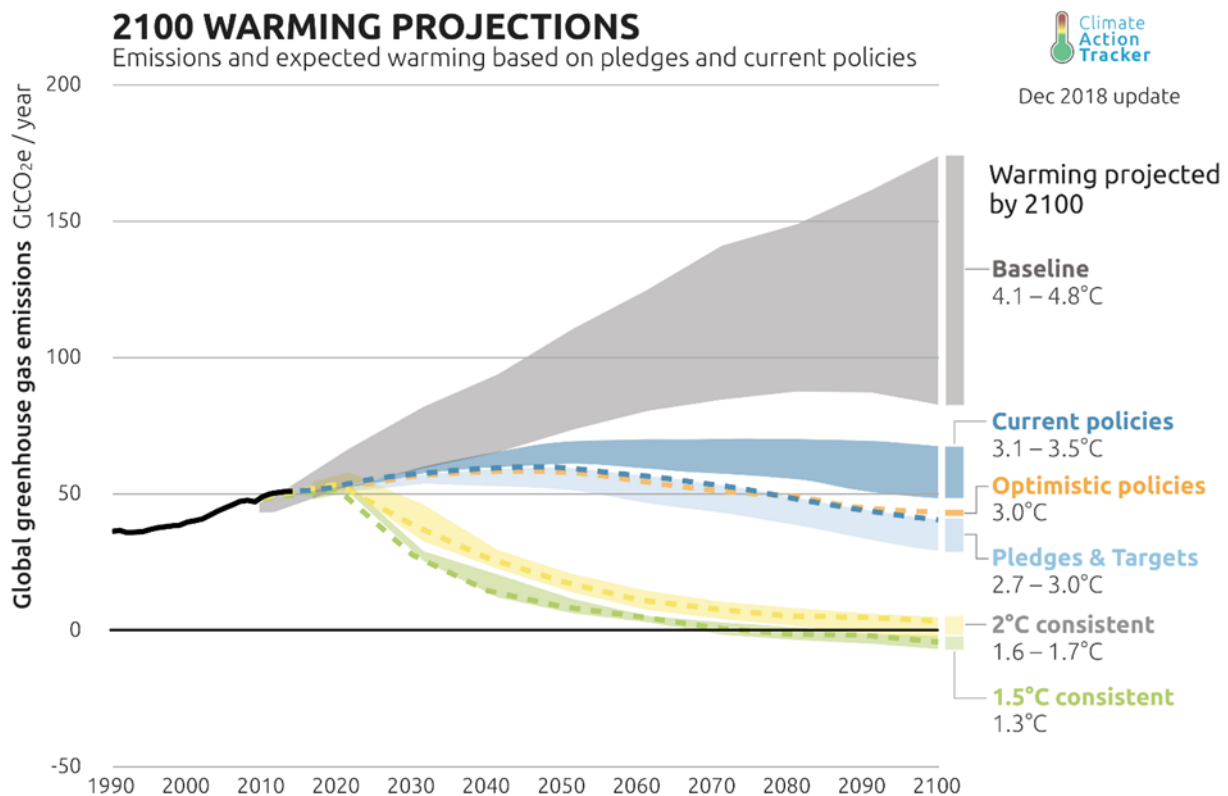
Quelle: Daten für Abbildungen (a) und (b) von (F. Krausmann et al., 2018) und Abbildung (c) von (IPCC, 2014b).

Um den globalen Herausforderungen entgegenzutreten wurde 1992 die Klimarahmenkonvention verabschiedet. Sie trat 1994 in Kraft und gilt als Meilenstein des weltweiten Klimaschutzes. 1997 verpflichteten sich zahlreiche Industriestaaten im Kyoto-Protokoll erstmals rechtlich verbindlich dazu, ihren Treibhausgasausstoß zu senken - ein bedeutender Schritt, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Mit der Verabschiedung des Übereinkommens von Paris auf dem Klimagipfel im Dezember 2015 in Paris (UNFCCC COP21) sind nun alle Staaten in ein umfassendes Klimaabkommen für die Zeit nach 2020 eingebunden. Die Staaten verpflichten sich darin, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg bereits bei 1,5 °C zu stoppen (UNFCCC, 2015).

Die derzeit von den Staaten unter dem Übereinkommen von Paris geleisteten nationalen Beiträge (nationally determined contributions – NDCs) sind nicht ausreichend, um mit hoher Wahrscheinlichkeit den Temperaturanstieg auf deutlich unter 2 °C bzw. 1,5 °C zu begrenzen. Wie Abbildung 1-3 verdeutlicht, können die bisherigen politischen Maßnahmen bei vollständiger Umsetzung zwar zu einer Absenkung führen, diese Anstrengungen sind allerdings noch nicht ausreichend, um auf einen 2°C - oder 1,5°C -kompatiblen Pfad zu gelangen (Climate Action Tracker, 2019; de Coninck et al., 2018). Um den Temperaturanstieg mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 66 % auf 2 °C begrenzen zu können, läge das noch

verfügbare Budget für die Zeit von 2016-2100 bei ca. 1.000 Gt CO<sub>2</sub> (C. Bertram et al., 2017). Hinsichtlich der Größe des verbleibenden Gesamtbudgets für die 1,5 °C-Erwärmungsgrenze (bei 66 % Wahrscheinlichkeit) besteht große Unsicherheit. Möglicherweise ist das Budget bereits aufgebraucht, ggf. stünden noch 200 Gt CO<sub>2</sub> bis zum Ende des Jahrhunderts zur Verfügung. Diese Unsicherheit fordert ein verantwortliches globales Handeln im Sinne der Vorsorge.

**Abbildung 1-3: Darstellung von globalen Treibhausgasprojektionen bis 2100**



Quelle: (Climate Action Tracker, 2019)

Der globale Verzicht auf die Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl und Erdgas bis spätestens zur Mitte dieses Jahrhunderts ist vor diesem Hintergrund unabdingbar. Aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen bei der Nutzung fossiler Energieträger, insbesondere von Kohle, ist ein möglichst frühzeitiger Ersatz von regenerativen Energieträgern notwendig. Vor diesem Hintergrund nimmt die Energiegewinnung aus Wind, Sonne, Wasser und Biomasse seit Jahren global an Bedeutung zu. Die installierte Leistung an erneuerbaren Energien lag 2017 bei 2.195 Gigawatt (GW). Diese decken heute knapp 25 % des weltweiten Strombedarfs (REN21, 2018).

Der Zuwachs an erneuerbaren Energien spart fossile Energierohstoffe ein und vermeidet die damit verbundenen Umweltwirkungen und Gefahren. Gleichzeitig ist der Zubau an erneuerbaren Energien mit steigenden Bedarfen für metallische und mineralische Rohstoffe verbunden, welche z. B. für den Bau von Solarenergie und Windenergieanlagen benötigt werden. Über vorgelagerte Ketten, das heißt über Materialien und Produkte zur Herstellung, erfordert auch die Bereitstellung der für die Energiewende direkt eingesetzten Komponenten teilweise große Mengen an Energie und damit an fossilen Energieträgern, welche das Klima belasten. Zudem sind häufig mit der Förderung und Aufbereitung in den Abbauländern durch Kontamination von Böden und Wasser weitere Umweltwirkungen und Gesundheitsschädigungen verbunden (UNEP, 2013). Bereits heute gibt es erste Anzeichen dafür, dass die Erzgehalte von Rohstoffen wie Kupfer, Gold, Blei, Zink, Nickel und Silber in einzelnen

Lagerstätten abnehmen (Mudd, 2009). Sinken die Erzgehalte, führt dies zu höheren Energiebedarfen bei der Förderung der Rohstoffe und zu einer Zunahme an Abraum und Abfällen sowie Emissionen in Wasser, Boden und Luft (Norgate et al., 2007). Diese vereinfachte Darstellung einiger Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und Rohstoffinanspruchnahme und der damit verbundenen möglichen Wirkungen auf weitere natürliche Ressourcen zeigt, dass eine Transformation hin zu einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Gesellschaft, welche sich innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen bewegt, nur durch eine gemeinsame Betrachtung von Klima- und Ressourcenschutz möglich ist. Es gilt, sowohl die Inanspruchnahme von Ressourcen auf ein umweltverträgliches Maß zu reduzieren, als auch die Emission von Treibhausgasen weitestgehend zu minimieren.



## 2 Ausgangslage für Deutschland

Doch welche Wege sind es, die zu einem nachhaltigen und zukunftsfähigen Deutschland führen? Welche Synergien können auf dem Weg dahin gehoben werden? Welche Konflikte müssen dabei adressiert werden? Industriestaaten wie Deutschland tragen eine große, auch historische Verantwortung für den globalen Klima- und Ressourcenschutz. Denn ihr heutiges Wohlstandsniveau wurde zum Großteil durch eine überproportionale Nutzung fossiler Energieträger und Rohstoffe ermöglicht.

Vor dem Hintergrund der globalen Herausforderungen hat die EU-Kommission mit dem 6. EU-Umweltaktionsprogramm (EP & Rat der Europäischen Union, 2002) sich zum Ziel gesetzt, Umweltbelastung und Wirtschaftswachstum von einander zu entkoppeln und in diesem Zuge sowohl den Klimaschutz als auch die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen zu einem wesentlichen Bestandteil der europäischen Umwelt- und Wirtschaftspolitik gemacht. In der EU-Wachstumsstrategie „Europa 2020“ beschreibt die Europäische Kommission ihre Vision eines „ressourcenschonenden Europas“: das Wirtschaftswachstum ist von der Ressourcennutzung abgekoppelt und der Übergang zu einer emissionsarmen Wirtschaft durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger, Energieeffizienz und nachhaltiger Mobilität wird ermöglicht (EK, 2010). Aktuell dient der Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“) als Rahmen für die Ressourceneffizienzpolitik der EU. Der Energiefahrplan 2050 der Kommission beschreibt mögliche Wege der Dekarbonisierung des Energiesystems (EK, 2011). Im November 2018 hat die Kommission eine langfristige strategische Vision hin zur Treibhausgasneutralität bis 2050 vorgestellt (EK, 2018a). In ihrem kürzlich erschienen Reflexionspapier zu einem nachhaltigen Europa 2030 werden diese Politiken im Kontext der globalen Agenda 2030 der Vereinten Nationen und deren 17 Zielen für nachhaltige Entwicklung beschrieben (Sustainable Development Goals) (EK, 2019b).

Die Bundesregierung hat sich seit 2010 zu einer Minderung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) um 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber 1990 verpflichtet (BMW, 2010). Gleichwohl der Klimaschutzplan 2016 als übergreifendes Langfristziel eine „weitgehende Treibhausgasneutralität“ für Deutschland bis 2050 definiert, wird der Zielkorridor aus dem Jahr 2010 bestätigt. Das Umweltbundesamt hat hingegen bereits 2016 den oberen Minderungsrand von 95 % als Maßstab für eine Treibhausgasminderung im Klimaschutzplan gefordert (UBA, 2016g).

Um den Zielkorridor sicher zu erreichen, hat die Bundesregierung mit dem Klimaschutzplan 2050 (BMU, 2016b) ihre klimapolitischen Ziele weiter präzisiert. Insbesondere definiert der Klimaschutzplan 2050 das zwischenzeitliche Ziel einer THG-Emissionsminderung von mindestens 55 % bis 2030 gegenüber 1990 und die notwendigen Minderungsbeiträge der einzelnen Sektoren zur Erreichung dieses Zieles. Mit den im September 2019 vorgelegten „Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030“ (Bundesregierung, 2019) legt die Bundesregierung „Treibhausgasneutralität“ für Deutschland bis 2050 als neues Umwelthandlungsziel fest. Eine Ambitionssteigerung für den Zeithorizont 2030 wird indes nicht vorgenommen.

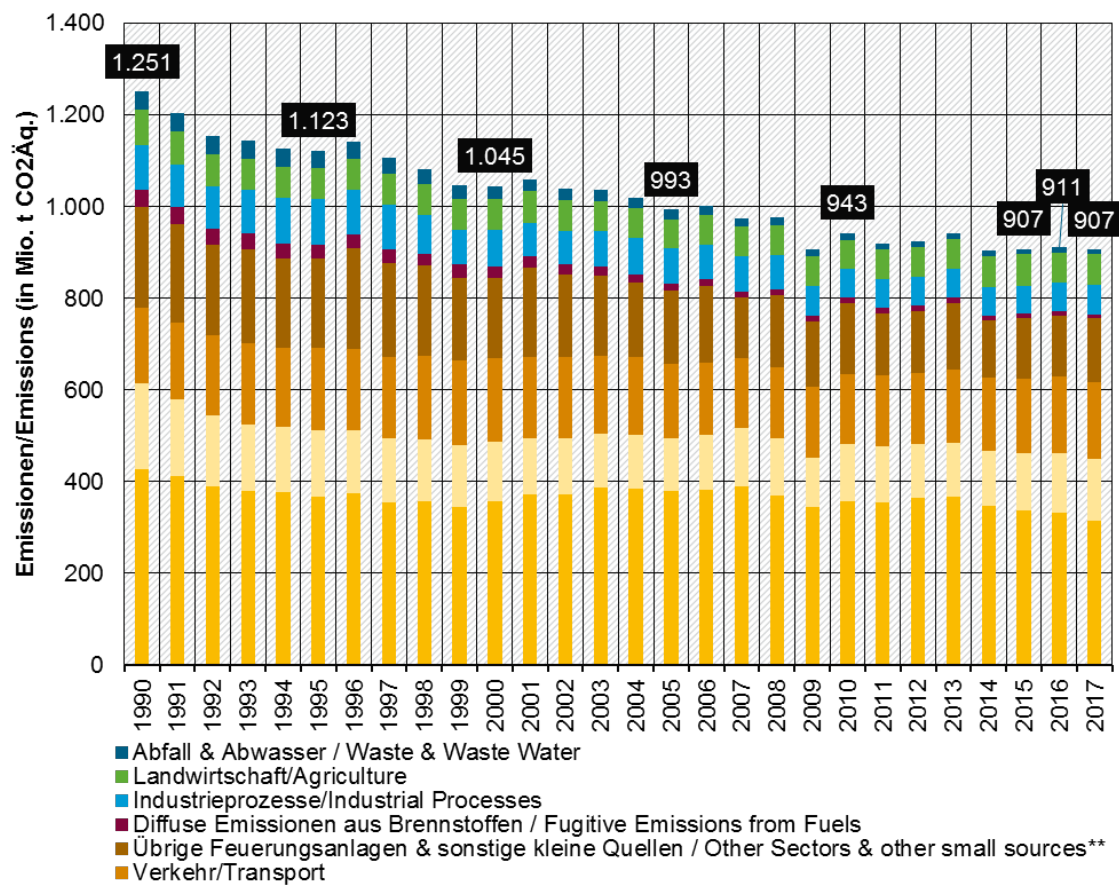
### Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Der Ausstoß von Treibhausgasen in Deutschland ist zwischen 1990 und 2017 von 1.251 Mio. t auf 907 Mio. t oder um 28 % zurückgegangen (UBA, 2019I). Nach ersten Schätzungen wurden 2018 insgesamt 866 Mio. t Treibhausgase freigesetzt – also rund 4,5 % weniger als im Vorjahr (UBA, 2019I).

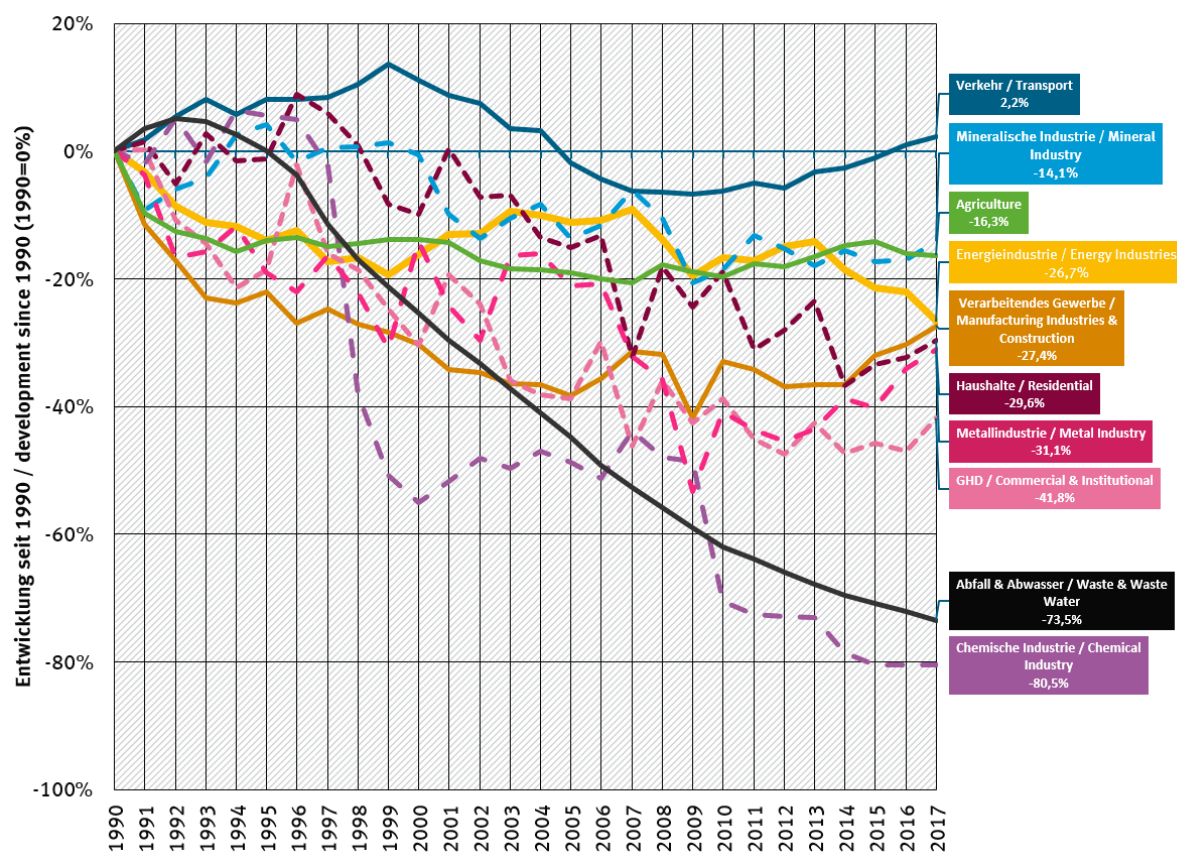
Bei den einzelnen Treibhausgasen dominiert die Freisetzung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Ihr Anteil betrug 2017 rund 88 % an den gesamten THG-Emissionen (UBA, 2019k). Das Kohlendioxid stammt größtenteils aus der stationären und mobilen Verbrennung fossiler Energieträger. Zu den weiteren Treibhausgasen, die jedoch teilweise deutlich höher Treibhauswirkung verursachen, zählen Methan (CH<sub>4</sub>), Distickstoffmonoxid (Lachgas, N<sub>2</sub>O) sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase). Die hauptsächlich durch Tierhaltung und Deponiewirtschaft verursachten Methanemissionen hatten 2017 einen Anteil von 6,1 % an den gesamten THG-Emissionen. Lachgasemissionen entstehen überwiegend durch stickstoffhaltige Düngemittel in der Landwirtschaft/Tierhaltung, Industrieprozessen und bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und beanspruchten einen Anteil von 4,2 %. Die F-Gase trugen etwa 1,7 % zu den THG-Emissionen bei. Sie entstehen durch die Herstellung und Verwendung von Kältemitteln, Treibmitteln in Schäumen und Dämmstoffen sowie Feuerlöschern (UBA, 2018b). Durch den stetig steigenden Anteil erneuerbarer Energie in der Energiewirtschaft sowie dem Trend hin zu emissionsärmeren Brennstoffen wie Erdgas sanken die energiebedingten Emissionen zwischen 1990 und 2017 um 26,1 %, siehe Abbildung 2-1. Gleichwohl sind die energiebedingten Emissionen mit 84,5 % weiterhin Hauptverursacher der gesamten deutschen THG-Emissionen.

Die relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Abbildung 2-2 zeigt, dass in der chemischen Industrie der stärkste Rückgang von Emissionen im Zeitraum 1990 bis 2017 erfolgte. Hier wirkten insbesondere die emissionsmindernden Maßnahmen bei der Adipinsäureproduktion 1997 und 2009 etwa durch den Rückgang von N<sub>2</sub>O-Emissionen (UBA, 2019o). Auch die Emissionen aus Abfall und Abwasser sanken, u. a. durch verstärktes Recycling von wiederverwertbaren Stoffen im Zuge der Verpackungsverordnung sowie die Verwertung von Bioabfällen als Kompost im Rahmen der Bioabfallverordnung. Diese haben zu einem starken Rückgang der zu deponierenden Abfallmenge und damit zu einer kontinuierlichen Minderung der Deponieemissionen geführt (UBA, 2019o). Die Emissionen aus dem Verkehrssektor sind als einzige seit 1990 leicht gestiegen. Etwa seit 2007 stagniert der Treibhausgasrückgang in diesem Sektor. Das Wachstum von Verkehrs- und Fahrleistungen sowie der Rückgang der eingesetzten Biokraftstoffe führte seit etwa 2013 sogar zu einem Wiederanstieg der Emissionen (UBA, 2019b). Die Abnahme der landwirtschaftlichen Emissionen seit 1990 geht im Wesentlichen auf eine Abnahme der Tierbestände, aber auch auf Reduktionen der Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und der Düngieranwendung zurück (UBA, 2019b).



**Abbildung 2-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen nach Kategorien**

Quelle: (UBA, 2019o)

**Abbildung 2-2: Relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen seit 1990 nach Sektoren**

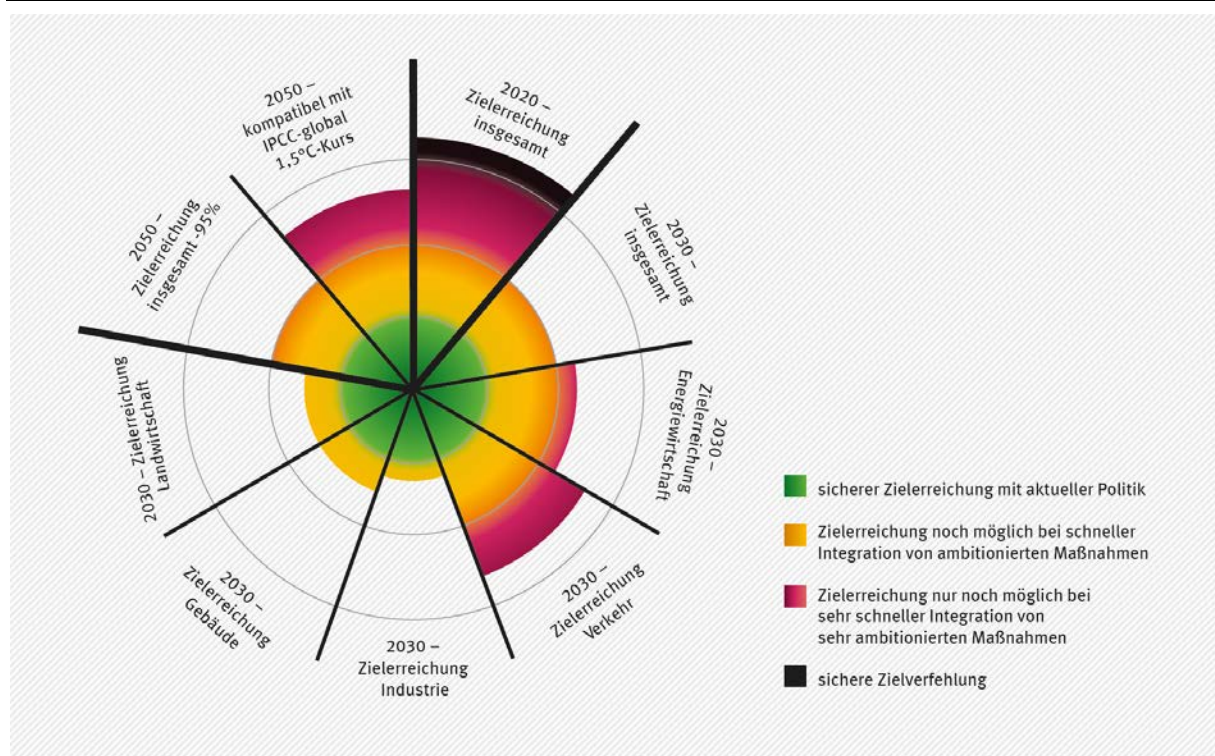
Quelle: (UBA, 2019a), Stand:11/2018

Wenngleich derzeit eine Reduktion der THG-Emissionen in nahezu allen Sektoren zu verzeichnen ist, zeigt ein Vergleich des aktuellen Trends mit den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung die Notwendigkeit weiterer Anstrengungen, siehe Abbildung 2-2. So ist bereits sicher, dass nach aktuellen Projektionen zur zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen das gesetzte Ziel einer Minderung um 40 % gegenüber 1990 bis zum Jahr 2020 nicht mehr erreichbar ist (BMU, 2019b). Dies ist in der Abbildung 2-3 neben der Einschätzung zu anderen Treibhausgasminderungszielen zu sehen. Sie zeigt ebenso, dass über die heutigen Politiken und Maßnahmen hinaus zeitnah weitere Maßnahmen ergriffen werden müssen, um die Klimaschutzziele 2030 nicht auch zu verfehlen. Die aktuellen Projektionen lassen eine Treibhausgasminderung bis 2030 von rund 42 % gegenüber 1990 erwarten (BMU, 2019b). Insbesondere im Verkehrsbereich sind dringend ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen notwendig, um das 2030er-Ziel der Bundesregierung noch erreichen zu können. Auch in allen anderen Bereichen sind zusätzliche Maßnahmen gegenüber heute erforderlich, um die sektoralen Ziele des Klimaschutzplan 2050 zu erreichen. In der Energieversorgung kann mit der Umsetzung der Empfehlungen der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (WSB-Kommission) das gesteckte Sektorziel 2030 zuverlässig erreicht werden (UBA, 2019j). Aus Sicht des Umweltbundesamts ist es vor dem Hintergrund der internationalen Vereinbarungen der Bundesregierung als Vertragspartei der Klimarahmenkonvention notwendig, schnell ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen mit dem Ziel einer weitestgehend treibhausgasneutralen Gesellschaft in Deutschland bis 2050<sup>16</sup> zu realisieren und die

<sup>16</sup> Dies bedeutet das Erreichen des oberen Endes des 2010 von der Bundesregierung beschlossenen Zielkorridors für 2050 von 95 % Treibhausgasreduzierung gegenüber 1990.

kumulierten Emissionen zu begrenzen, siehe dazu auch (UBA, 2019p). Wie in Abbildung 2-3 zu sehen, müssen für Deutschland dafür sehr schnell ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden. Um einem annähernd IPCC-konformen, globalen 1,5 °C-Transformationspfad<sup>17</sup> (IPCC, 2018a) in Deutschland gerecht zu werden, sind bereits für 2030 und 2040 höhere Treibhausgasreduzierungen erforderlich als bisher im Klimaschutzplan 2050 festgelegt.

**Abbildung 2-3: Qualitative Einschätzung Erreichbarkeit von Treibhausgasreduzierungszielen im Kontext des aktuellen Trends**



Hinweis: Mit den im September 2019 vorgelegten „Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030“ der Bundesregierung (Bundesregierung, 2019) wird für Deutschland „Treibhausgasneutralität“ bis 2050 als neues Umwelthandlungsziel benannt. Weiter werden Maßnahmen zur Erfüllung der 2030 Ziele beschrieben. Die konkrete Ausgestaltung ist jedoch zum Redaktionsschluss der RESCUE-Studie noch nicht hinreichend klar, um in der Abbildung berücksichtigt zu werden. Quelle: eigene Darstellung, eigene Einschätzung sowie auf Basis von (BMU, 2019b)

### Entwicklung der Rohstoffinanspruchnahme

Auch hinsichtlich der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen, insbesondere der Rohstoffnutzung, hat Deutschland frühzeitig konkrete Ziele aufgestellt. So formulierte die Bundesregierung in ihrer Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 (Bundesregierung, 2002) bereits das Ziel, die wirtschaftliche Entwicklung von der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen und der damit verbundenen Umweltwirkungen zu entkoppeln. Darauf aufbauend hat Deutschland mit der Verabschiedung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) im Jahr 2012 als einer der ersten Staaten Ziele, Leitideen und Handlungsansätze zum Schutz der natürlichen Ressourcen festgelegt (BMU, 2012). Die dort formulierten Ziele der Bundesregierung zur Rohstoffinanspruchnahme sind (1) eine möglichst weitgehende Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourceneinsatz sowie Senkung der damit verbundenen Umweltbelastungen und (2) die Stärkung der Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit der

<sup>17</sup> Gemeint ist ein globaler Transformationspfad, der der historischen Verantwortung, wirtschaftlichen Leistung, Bevölkerung oder weiteren Gerechtigkeitsaspekten nicht einzeln Rechnung trägt.



deutschen Wirtschaft und dadurch die Förderung von stabiler Beschäftigung und sozialem Zusammenhalt. ProgRess betrachtet hierbei die gesamte Wertschöpfungskette zur Steigerung der Materialeffizienz und zu einer absoluten Reduktion der Rohstoffinanspruchnahme. Das Programm wird alle vier Jahre fortgeschrieben.

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 1.024 Mio. t an abiotischen und biotischen Rohstoffen gefördert (Statistisches Bundesamt, 2019d). Dazu gehören fossile Energieträger, Erze, mineralische und biotische Rohstoffe wie Holz, Nahrungsmittel und weitere Biomasse. Dies bedeutet insgesamt einen Förderrückgang um circa 23 % seit 1994, wobei die Entnahme nachwachsender Rohstoffe um rund 28 % zugenommen hat. Importe und Exporte spielen eine zentrale Rolle in Deutschlands Volkswirtschaft. 2016 wurden etwa 672 Mio. t. Materialien importiert, davon 52 % Rohstoffe, 19 % Halbwaren, 22 % Fertigwaren und 7 % sonstige Waren (Statistisches Bundesamt, 2019d). Die Exporte als Fertigwaren (42 %), Halbwaren (31 %), Rohstoffe (21 %) und sonstige Waren (6 %) lagen bei rund 401 Mio. t.

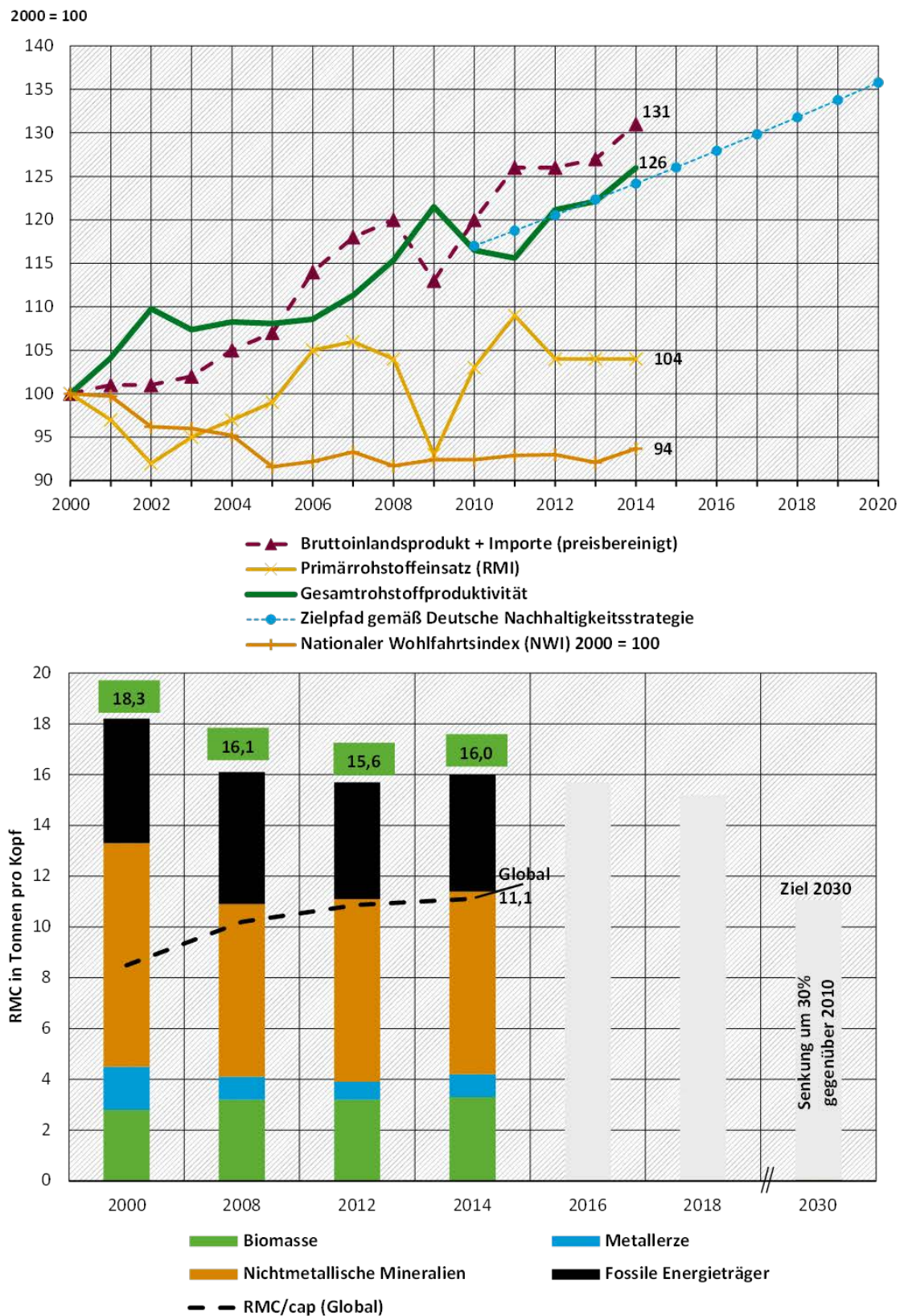
Der Leitindikator der deutschen Ressourcenpolitik, „Gesamtrohstoffproduktivität“<sup>18</sup> misst Deutschlands Fortschritt im sparsamen und effizienten Einsatz von Rohstoffen. Die Gesamtrohstoffproduktivität stieg von 2000 bis 2014 um 26 % (Statistisches Bundesamt, 2018c). Das Ziel der Bundesregierung ist es, die Gesamtrohstoffproduktivität weiter um durchschnittlich 1,5 % pro Jahr von 2010 bis 2030 zu erhöhen. Der durchschnittliche Anstieg um 1,9 % liegt aktuell über diesem Ziel (Abbildung 2-4 oben).

Die Rohstoffnutzung pro Kopf ist zwischen 2000 und 2014 um 13 % gesunken. Dies lässt sich zum Großteil auf den Rückgang der Bauinvestitionen zwischen den Jahren 2000 und 2010 erklären. Insgesamt entwickelte sich die Rohstoffnutzung seit dem Jahr 2008 in keine eindeutige Richtung. Der globale Mittelwert nach Berechnungen des UNEP Ressourcenrats liegt 2014 bei 11.1 Tonnen pro Kopf (UNEP, 2019b). Im internationalen Vergleich wird deutlich, dass die deutsche Rohstoffnutzung über dem globalen Durchschnitt liegt und weiter gesenkt werden sollte. Das Ziel der Bundesregierung ist die Senkung um 30 % bis 2030 gegenüber 2010 (Abbildung 2-4 unten).

---

<sup>18</sup> Für die Berechnung wird der Primärrohstoffeinsatz (inländischen Rohstoffentnahme + Importe (RMI)) mit der gesamten Wertschöpfung ins Verhältnis gesetzt, die mit diesen Rohstoffen geschaffen wurden (Bruttoinlandsprodukt (BIP) + Wert der Importe). Der RMI basiert dabei auf dem Konzept der „Rohstoff-Äquivalente“ und umfasst das Gesamtgewicht der Primärrohstoffe, die benötigt wurden, um die Güter herzustellen, die in der deutschen Volkswirtschaft produziert oder in diese importiert wurden. Das umfasst auch die indirekt importierten Rohstoffe, die entlang der Produktionsketten im Ausland eingesetzt werden.

**Abbildung 2-4: Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität (oben) und der pro-Kopf Rohstoffnutzung (unten) in Deutschland<sup>19</sup>**



Quelle: eigene Darstellung basierend auf (Statistisches Bundesamt, 2018a; UBA, 2019i); globaler Wert für RMC/Kopf von der UNEP MFA Datenbank (UNEP, 2019b)

### **Nutzung weiterer natürlicher Ressourcen**

Neben der Reduktion der Rohstoffinanspruchnahme ist die notwendige Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft auch mit weiteren Zielen zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung in Einklang zu bringen.

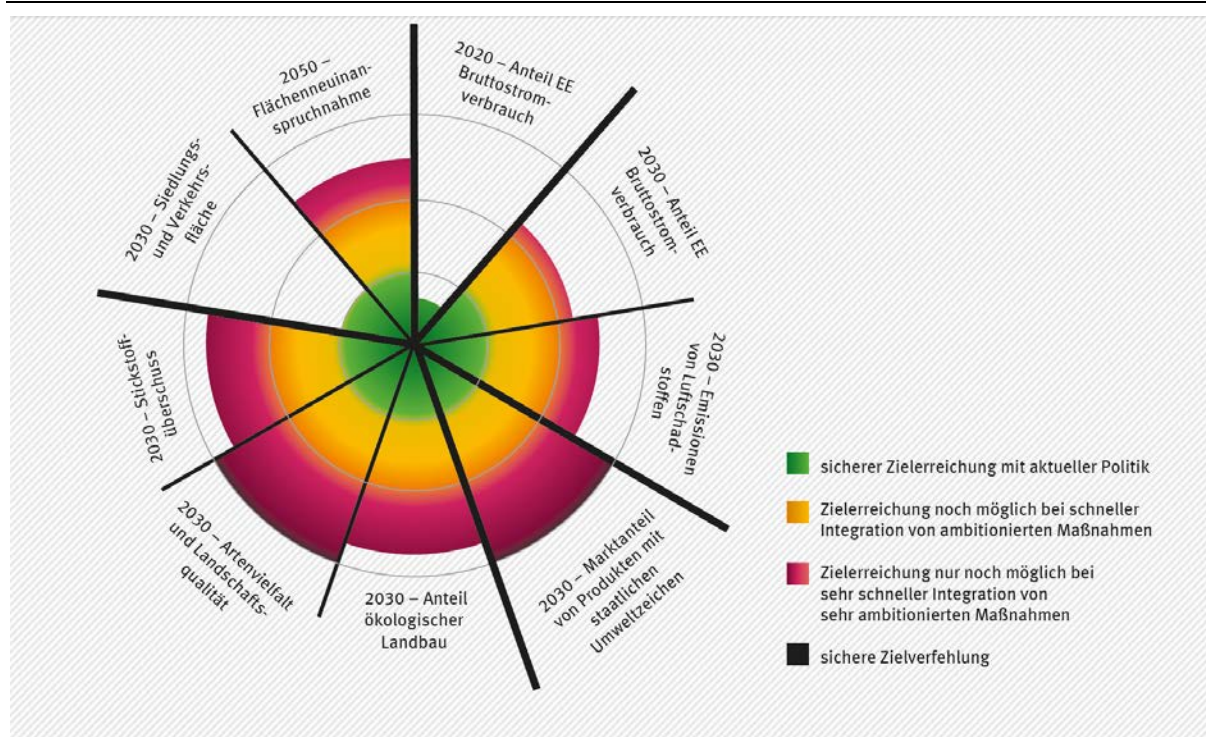
So sind neben der Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems und der notwendigen Veränderungen der Industrie, die zukünftige Ausgestaltung der Land- und Forstwirtschaft, Aspekte der Flächennutzung oder des privaten Konsums wesentliche Einflussgrößen. Wichtige Ziele in diesem Kontext sind in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung, 2016) formuliert.

Mehr als die Hälfte der Gesamtfläche Deutschlands von rund 357 000 km<sup>2</sup> wird landwirtschaftlich genutzt, rund ein Drittel ist bewaldet. Siedlungs- und Verkehrsflächen haben einen Anteil von ca. 14 % (Statistisches Bundesamt, 2019b). Tendenziell nimmt die landwirtschaftliche Nutzfläche ab, während die Siedlungs- und Verkehrsflächen zunehmen. Die aktuelle Entwicklung der Flächenneuanspruchnahme lässt die Erreichung des Zieles der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, die Inanspruchnahme zusätzlicher Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke bis zum Jahr 2030 auf unter 30 Hektar pro Tag zu begrenzen, als erreichbar erscheinen. Eine langfristige Vermeidung zusätzlicher Flächenneuanspruchnahme, das heißt eine netto null Flächenversiegelung bis 2050, ist nach heutigem Stand jedoch nur unter großen Anstrengungen realisierbar, siehe Abbildung 2-5. Das bedeutet, dass eine weitestgehend treibhausgasneutrale Gesellschaft auch möglichst flächensparend ausgestaltet werden muss, wenn das langfristige Ziel der Vermeidung der Flächenneuanspruchnahme (netto) ebenso erreicht werden soll.

---

<sup>19</sup> Das BIP in der Berechnung der Gesamtrohstoffproduktivität ist ein Maß für die Wirtschaftsleistung einer Volkswirtschaft. Dieses spiegelt jedoch nicht die gesellschaftliche Wohlfahrt wider. Ergänzend zum BIP ist deshalb auch der Nationale Wohlfahrtsindex (NWI) in der Abbildung 2-4 abgebildet. Der NWI berücksichtigt insgesamt 20 wohlfahrtsstiftende und wohlfahrtsmindernde Aktivitäten. Er erreichte im Jahr 1999 seinen höchsten Wert und nahm danach bis 2005 ab. Seit-dem schwankt er ohne große Änderungen.



**Abbildung 2-5: qualitative Einschätzung weiterer Umwelttrends im Vergleich zu den Zielen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie**

Quelle: eigene Darstellung; eigene Einschätzung sowie auf Basis von (Statistisches Bundesamt, 2018b)

Die Landwirtschaft ist einer der wenigen Sektoren, die auch in einer weitestgehend treibhausgasneutralen Gesellschaft weiterhin THG-Emissionen verursachen würden, da diese nicht vollständig vermeidbar sind. Zusätzlich ist die Landwirtschaft eine Hauptquelle relevanter Immissionen in Boden und Wasser, z. B. von Stickstoff (Heißenhuber et al., 2015). Der ökologische Landbau ist eine umwelt-, klima- und naturverträglichere Art der Bewirtschaftung. Ziel sind möglichst geschlossene Nährstoffkreisläufe und ein Wirtschaften im Einklang mit der Natur. Daher hat sich die Bundesregierung auch das Ziel gesetzt, den Flächenanteil des Ökologischen Landbaus bis 2030 auf 20 % zu steigern. Von diesem Ziel ist Deutschland jedoch noch sehr weit entfernt, wie in Abbildung 2-5 visualisiert.

Auch unser Konsum ist in vielfältiger Weise mit Umweltwirkungen verbunden. Und durch die unmittelbare Verbindung zur Produktion der konsumierten Güter sind die Wirkungen der Produktion wie Emissionen von Schadstoffen und Treibhausgasen hier eng verflochten mit unserer Nachfrage nach Gütern. Daher spielt die weitere Förderung des nachhaltigen Konsums eine wichtige Rolle in der Transformation zur weitestgehend treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Gesellschaft. Mit dem Ziel, den Marktanteil von Produkten mit staatlichen Umweltzeichen bis 2030 auf 34 % zu erhöhen, beabsichtigt die Bundesregierung hier aktivierend zu unterstützen. Der Marktanteil ist von 3,6 % im Jahr 2012 auf 8,6 % im Jahr 2016 angestiegen. Wenngleich eine Bewertung der aktuellen Entwicklung aufgrund der kurzen Beobachtungszeit nur eingeschränkt möglich ist, so ist jedoch erkennbar, dass erhebliche weitere Anstrengungen unternommen werden müssen, um das Ziel bis 2030 zu erreichen.

#### Ausblick auf die vorliegende Studie

Wie die vorangegangenen Kapitel skizzierten, ist eine Transformation hin zu einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Gesellschaft, welche sich innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen bewegt, in vielfältiger Weise mit der Nutzung natürlicher Ressourcen verbunden. Dennoch fokussiert diese Studie zunächst auf mögliche Transformationspfade zur



Erreichung einer **rohstoffeffizienten und treibhausgasneutralen Gesellschaft**. Die Betrachtung einzelner Herausforderungen, sowohl des Klima- als auch des Ressourcenschutz, wurden bereits mehrfach untersucht. Beispielsweise hat die UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 (THGND2050)“ gezeigt, dass eine weitestgehende Treibhausgasneutralität (eine Minderung von Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990) in Deutschland bis 2050 technisch machbar ist (UBA, 2014c). Dabei wurden insbesondere technische Möglichkeiten in den unterschiedlichen Sektoren wie Verkehr, Industrie, Landwirtschaft etc. betrachtet. Eine Schlüsselstellung nimmt hierbei die Transformation hin zu einem Energiesystem basierend auf 100 Prozent erneuerbarer Energie ein. Durch den vollständigen Umstieg auf erneuerbare Energien und die Ausschöpfung von Effizienzpotenzialen ist es möglich, die Treibhausgasemissionen der Energieversorgung und -nutzung (Strom, Wärme, Verkehr) im Inland<sup>20</sup> auf null zu reduzieren. Zentraler Baustein ist die Sektorkopplung mit der direkten Stromnutzung (z. B. Power to Heat, Elektromobilität) oder indirekten Nutzung mittels Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Liquid (PtL), so dass treibhausgasneutrale Kraftstoffe für den Verkehr, Grundstoffe für die chemische Industrie und Prozesswärme für die Industrie bereitgestellt werden können. Allerdings sind für bestimmte Sektoren wie die Landwirtschaft, Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) sowie, nach heutigem Kenntnisstand, auch in Teilen der Industrie die Möglichkeiten zur Treibhausgasminderungen begrenzt, so dass auch in diesem ambitionierten Szenario Treibhausgasemissionen verbleiben. Die THGND2050-Studie stellte jedoch keinen Transformationspfad zu dem aufgezeigten Zielpunkt dar und betrachtete keine Ressourceninanspruchnahmen.

Mit der vorliegenden Studie werden nun in einer systemischen Vorgehensweise **ambitionierter Klima- und Ressourcenschutz** über alle Anwendungsbereiche hinweg gemeinsam betrachtet. Dies erfolgt mittels sechs Szenarien, welche mögliche Entwicklungspfade Deutschlands bis zum Jahr 2050 aufzeigen. Sie umfassen mögliche Entwicklungen in Deutschland z. B. im Bereich Energieeffizienz, Materialeffizienz und Produktlebensdauern, Lebensstiländerungen und Wirtschaftswachstum. Ziel ist es aufzuzeigen, wie sich der Rohstoffbedarf für ein treibhausgasneutrales Deutschland 2050 im Zeitverlauf ändert, welche Auswirkungen einzelne Maßnahmen und Annahmen auf Rohstoffinanspruchnahme und Treibhausgasemissionen haben und welche Wechselwirkungen es zwischen Anstrengungen im Ressourcenschutz und Klimaschutz gibt. Im eingeschränkten Maße werden auch Fragen der Flächenneuinanspruchnahme in Deutschland betrachtet. Weitere Aspekte, wie die zeitgerechte Verfügbarkeit von Rohstoffen oder weitere Umweltwirkungen, konnten nur am Rande berücksichtigt werden und sollten Grundlage weiterer zukünftiger Studien sein.

---

<sup>20</sup> In der Studie wurden nur die Treibhausgasemissionen in Deutschland nach dem jährlich erstellten Nationalen Inventarbericht (NIR) betrachtet. Nicht betrachtet werden die im Ausland anfallenden Emissionen für importierte Gütern ("Carbon Footprint") sowie die Emissionen für exportierte Güter.

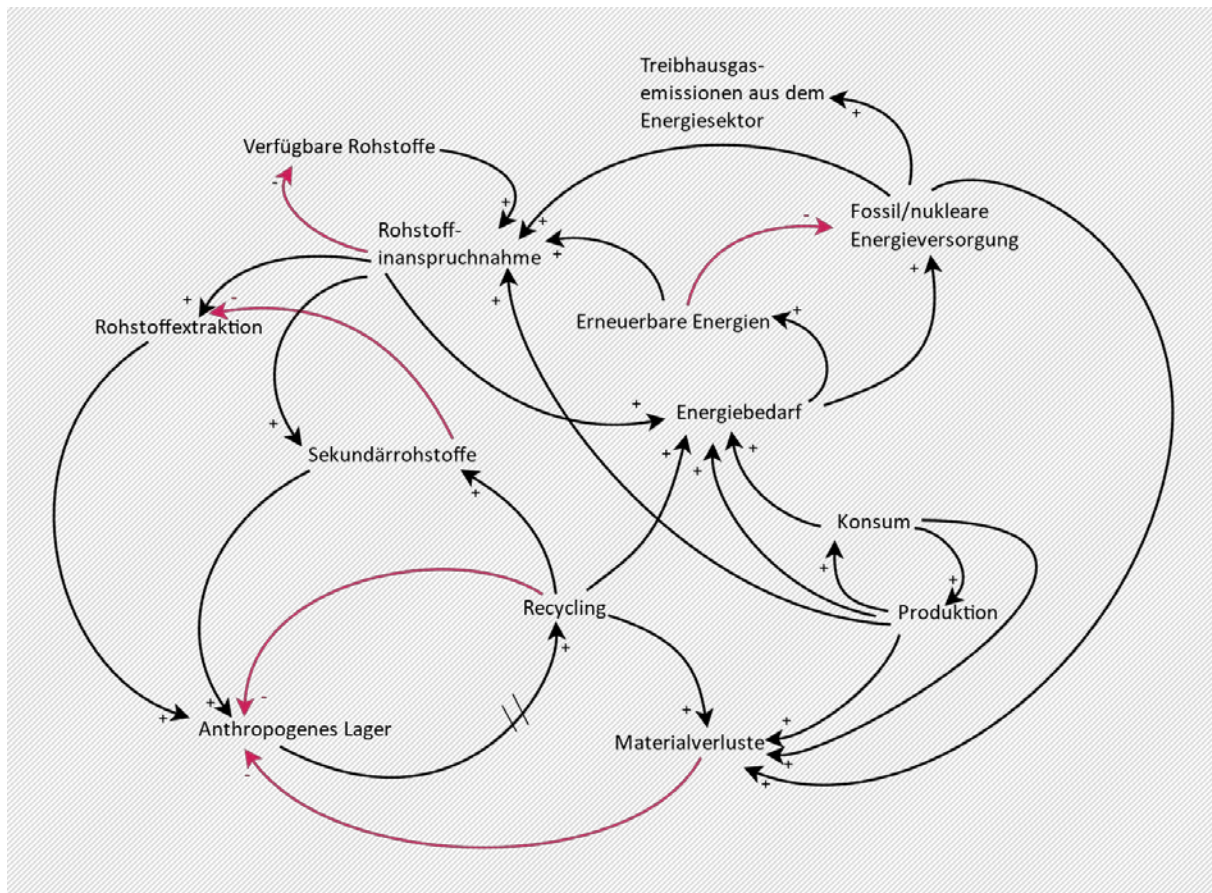
### 3 Integrierte Betrachtung

Eines der zentralen Ziele der Transformation zu einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland ist der Umbau zu einem 100 % erneuerbaren Energiesystem – sowohl in den Bereichen Strom, Wärme, Verkehr und Industrieprozessen. Dabei werden die fossilen Energieträger substituiert und die prozessbedingten Emissionen aus der Industrie sind minimiert. Wie bereits aufgezeigt, bedeutet allein der Umbau des Energiesystems von einem fossil-basierten auf ein erneuerbares System erhebliche Änderungen bei der Rohstoffinanspruchnahme: der Verbrauch der fossilen Rohstoffe nimmt ab, aber gleichzeitig werden neue Infrastrukturen und Technologien wieder aufgebaut (Hirschnitz-Garbers et al., 2018). Diese basieren oftmals auf veränderten Materialkompositionen wie z. B. verstärkte Nutzung von Spezialmetallen und seltenen Erden für erneuerbare Energiesysteme. Die Zeitpunkte und Zeitverläufe sind allerdings entscheidend für die jeweiligen Bilanzen. Mit Hilfe von systemischen bzw. systemdynamischen Analysen lassen sich derartige wechselseitige Abhängigkeiten zwischen und innerhalb der physikalisch-geologischen sowie den ökonomisch-sozialen Systemen betrachten. Dabei ist es Ziel der Betrachtungen, die Komplexität der Systeme erfassbar zu machen.

Komplexe Systeme sind durch nicht-lineare Rückkopplungs- und Selbstorganisationsprozesse sowie Pfadabhängigkeiten charakterisiert (Bar-Yam, 2002). Einfache lineare Ursache-Wirkungsbeziehungen liegen in komplexen Systemen zumeist nicht vor (Imboden & Koch, 2003), so dass Interventionen und Steuerungen eine besondere Herangehensweise benötigen. Komplexe Systeme können jedoch in ihrer Gesamtheit verstanden und gesteuert werden, wenn man die maßgeblichen Faktoren, deren Wirkungszusammenhänge, wirksame Ansatzpunkte und die besonderen Eigenschaften der Systeme berücksichtigt.

Bei der Gestaltung von politischen Maßnahmen ist es hilfreich, eine systemische Perspektive einzunehmen, um Eigenschaften wie Verzögerungen, Rückkopplungen und ambivalente Wirkungen in die Politikempfehlungen mit einzuschließen und somit zu verhindern, dass die Maßnahmen nicht den gewünschten Effekt haben. Werden wie in der vorliegenden Analyse gleichzeitig zwei Politikfelder – Ressourcenschonung und Klimaschutz – betrachtet, sollte es das vordergründige Ziel sein, Erfolge in dem einen Politikfeld nicht auf Kosten des anderen zu erreichen. Im besten Fall gelingt es, Synergien zwischen den beiden Politikfeldern zu finden und systematisch zu erschließen. Um die wechselseitigen Abhängigkeiten der beiden Politikfelder zu verstehen, können die Zusammenhänge des Systems mit Hilfe eines vereinfachenden Ursache-Wirkungsdiagramms („Causal Loop Diagram -CLD“) dargestellt und analysiert werden, siehe Abbildung 3-1.

**Abbildung 3-1: Kausaldigramm (CLD) des Zusammenhanges zwischen Ressourceninanspruchnahme und THG-Emissionen**



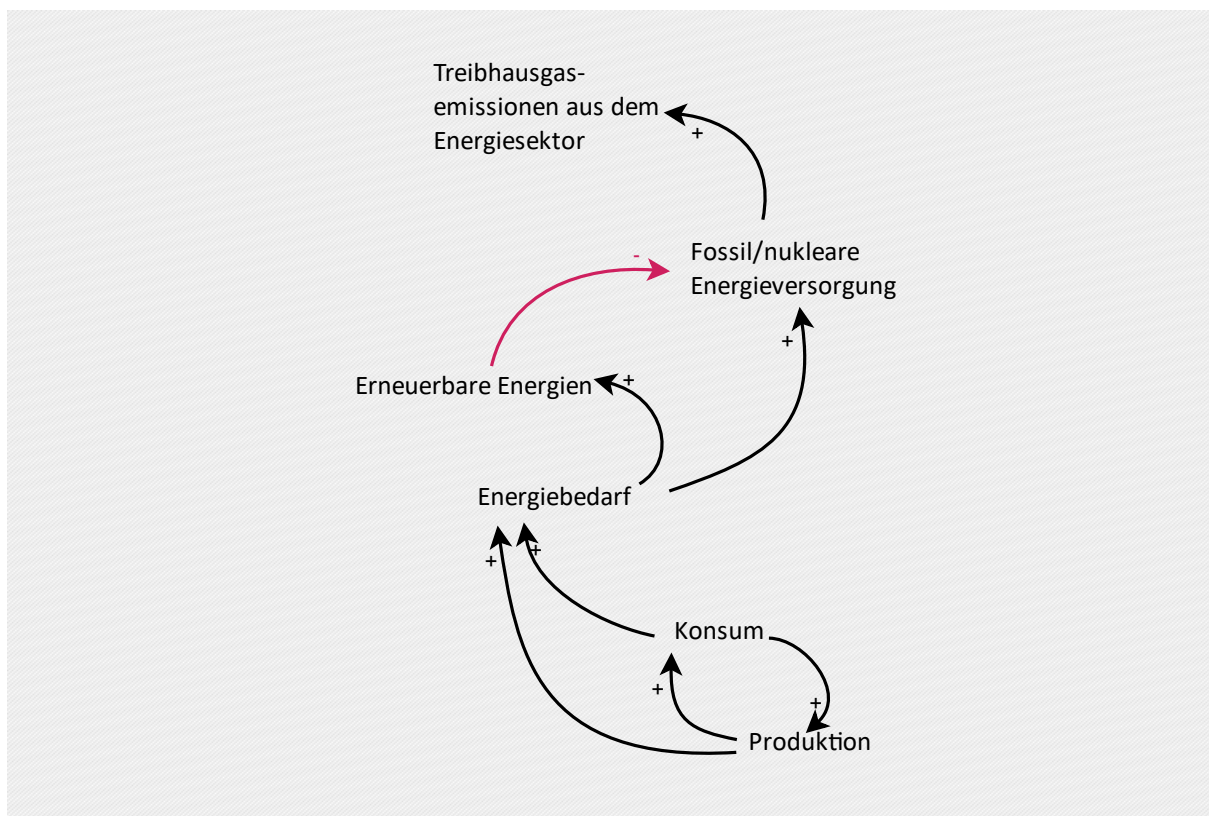
Hinweis: Im CLD sind einzelne Variablen (in Form von Begriffen) mittels Pfeile (Kausalzusammenhänge) verbunden. Ein Pfeil von A nach B mit positiver Polarität („plus“) bedeutet, dass eine Änderung in A eine Änderung in B in gleicher Richtung bewirkt. Ein Pfeil von A nach B mit negativer Polarität („minus“ – im CLD in roter Farbe dargestellt) beschreibt, dass eine Änderung in A eine Änderung in B in entgegengesetzter Richtung bewirkt.

Quelle: eigene Darstellung

Zentral in diesem System stehen - stark vereinfacht gesprochen - „Produktion“ und „Konsum“ und die entsprechende Bereitstellung der dafür notwendigen Energie, zumeist in Form von Strom oder Wärme (Abbildung 3-1). Produktion und Konsum sind hierbei Begriffe aus der Wertschöpfungskette, wenngleich jeweils in einem breiten Sinne zu verstehen. Für die hier vereinfachte Darstellung schließt Produktion auch die Vorketten der Güter mit ein (Handel und Transport). Konsum beginnt mit dem Akt des Kaufs und beinhaltet die komplette Nutzungsphase. Daraus erklärt sich, dass der Konsum den Energiebedarf der Nutzungsphase miteinschließt.

Der Energiebedarf wird aktuell fossil bzw. nuklear und z.T. bereits durch erneuerbare Quellen (Sonne, Wind, Wasserkraft, Erdwärme) gedeckt (Abbildung 3-2). Wird der Energiebedarf zunehmend aus erneuerbaren Quellen gedeckt, verringert sich anteilig die Versorgung aus fossilen Quellen (orangefarbener Pfeil mit negativer Polarität in Abbildung 3-2).

**Abbildung 3-2: Ausschnitt des CLD mit Fokus auf das den Kreislauf „Produktion-Konsum“ und den damit verbundenen Energiebedarf**



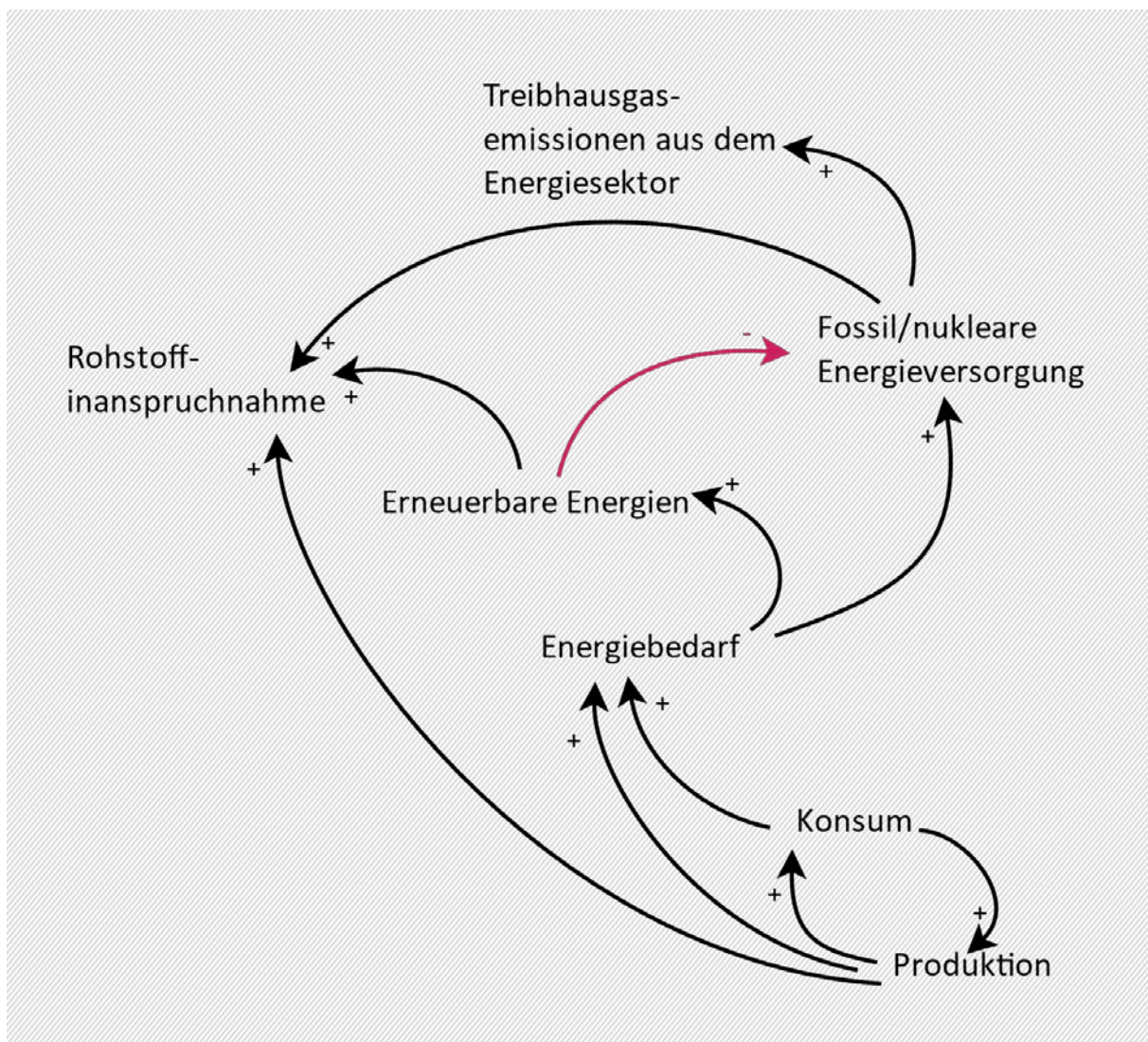
Quelle: eigene Darstellung

Solange der Energiebedarf fossil gedeckt wird, werden fossile Rohstoffe (Kohle, Erdöl, Gas etc.) aus der Erdkruste gewonnen. Diese werden nicht nur für den Bau der Anlagen genutzt, sondern vor allem während der Betriebsphase verbraucht. Je mehr Strom und Wärme fossil gewonnen werden, desto mehr (fossile) Rohstoffe werden benötigt und verbraucht und somit Treibhausgase in die Atmosphäre abgegeben.

Wird die Energie aus erneuerbaren Quellen gewonnen, werden während der Energiegewinnung – mit der Ausnahme von neuen Materialien für die Instandhaltung und Reparatur – keine Rohstoffe verbraucht. Allerdings werden Rohstoffe für den Bau der Anlagen (z. B. Windkraft, Photovoltaik) benötigt. Diese Rohstoffe bleiben allerdings in der Anlage erhalten und können theoretisch wiederverwertet werden (Remanufacturing, Recycling). Das so genannte „Anthropogene Lager“ (Hedemann et al., 2017; Schiller et al., 2015) wird weiter aufgebaut. Es ist in der Rohstoffbilanz ein erheblicher Unterschied, ob ein Rohstoff z. B. durch Verbrennung verbraucht wird, per Dissipation verloren geht oder im anthropogenen Materiallager (hier in erneuerbaren Energiesystemen) gebunden wird und durch Recycling am Produktlebensende weiter genutzt werden kann. Im Falle des Verbrauchs hat – thermodynamisch gesprochen – die Entropie wesentlich zugenommen und eine chemische Umwandlung stattgefunden. Im Falle der Dissipation sind die Stoffe zwar chemisch gesehen unverändert, allerdings so fein in der Umwelt verteilt, dass der Energieaufwand der Wiederaufkonzentrierung immens wäre. Bei der Überführung in das anthropogene Lager sind die Rohstoffe zu einem großen Teil weiter nutzbar. Abbildung 3-3 verdeutlicht, wie die Rohstoffinanspruchnahme mit der Bereitstellung von Energie und der Produktion verbunden ist.



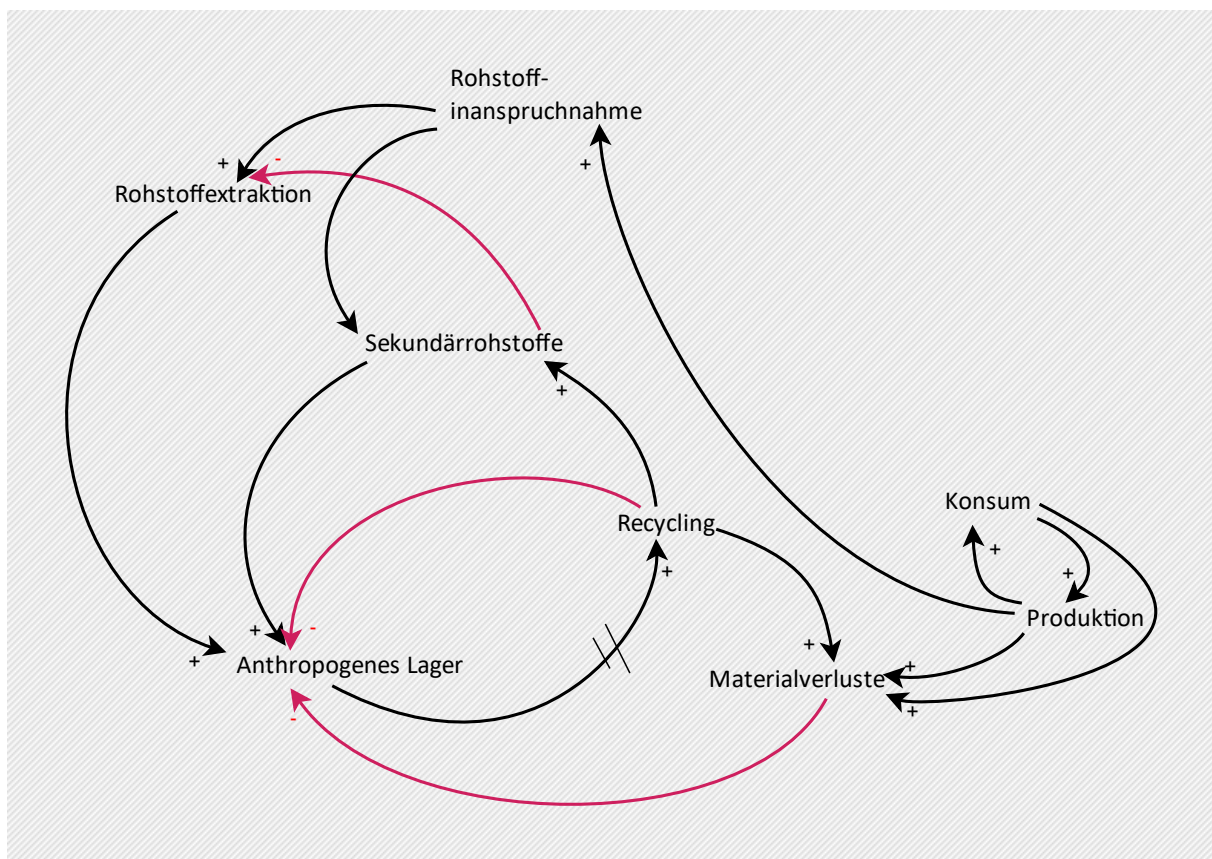
**Abbildung 3-3: Ausschnitt des CLD mit Fokus auf den Zusammenhang Rohstoffe und Energieversorgung**



Quelle: eigene Darstellung

Um Rohstoffe überhaupt nutzen bzw. in Anspruch nehmen zu können, werden sie aus primären Quellen oder als Sekundärrohstoff gewonnen.

Das anthropogene Materiallager beschreibt demnach alle Rohstoffe, die aus ihren natürlichen Lagerstätten entnommen und zu Infrastrukturen, Gebäuden und Gütern des täglichen Gebrauchs umgewandelt wurden. Das anthropogene Lager wird aus Primärrohstoffen aus der Rohstoffextraktion und den Sekundärrohstoffen gespeist (Abbildung 3-4). Nach Ablauf der Lebensdauer der bestehenden Güter und Bauwerke stehen die darin vorhandenen Materialien wieder als Sekundärrohstoffe für die weitere Nutzung zur Verfügung. Beim Recycling entstehen auch Reststoffe, die nicht weiter nutzbar sind und damit aus dem Kreislauf fallen. Ebenso entstehen während der Produktion Rohstoffabfälle, die nicht weiter nutzbar in der Wertschöpfungskette sind. Materialverluste reduzieren somit die Menge an Materialien, die im anthropogenen Lager für zukünftige Nutzung verbleiben (siehe orangefarbenen Pfeil mit negativer Polarität in (Abbildung 3-4).

**Abbildung 3-4: Ausschnitt des CLD mit Fokus auf das "Ressourcensystem"**

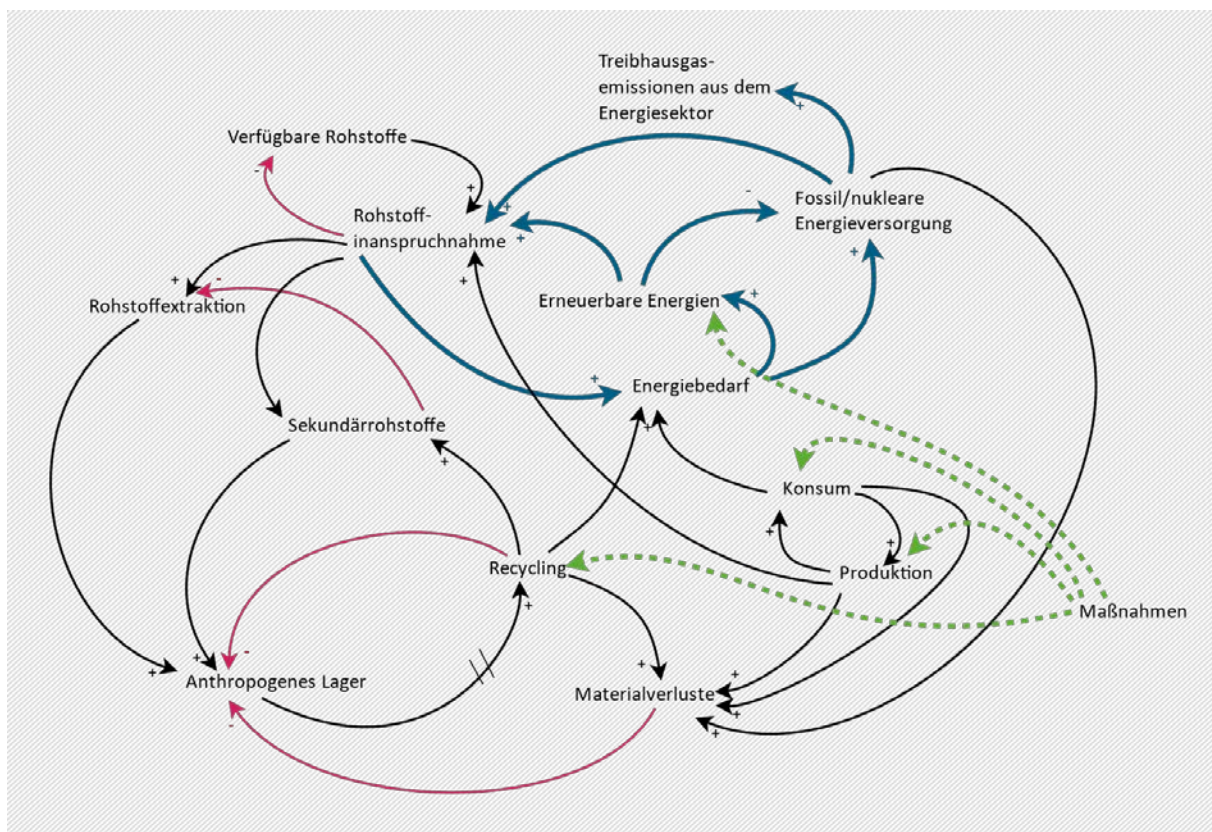
Quelle: eigene Darstellung

Auch das Recycling und die Rohstoffinanspruchnahme sind Prozesse, die ihrerseits Energie (und wieder Rohstoffe für die Infrastruktur) brauchen. Zentrale Wirkungsschleifen stellen der Produktions-Konsumkreislauf sowie der Kreislauf zwischen Energiebedarf und Rohstoffinanspruchnahme dar.

Zur Ableitung politischer Maßnahmen können in einem solchen System unterschiedliche Ansatzpunkte identifiziert werden. In Abbildung 3-5 sind einige dieser Ansatzpunkte mit grünen Pfeilen markiert. Allein durch das „Lesen“ der Kausalverbindungen in dem Modell sind bereits erste Erkenntnisse hinsichtlich der potentiellen Folgen der Maßnahmen möglich. Beispielsweise ist im CLD in Abbildung 3-5 der bereits erwähnte Zusammenhang zwischen dem Aufbau des Erneuerbaren-Energien-Systems einerseits und der damit verbundenen Reduktion der Nutzung an fossilen Rohstoffen andererseits aufgezeigt. Gleichzeitig nimmt jedoch die Rohstoffinanspruchnahme für den Aufbau der Infrastruktur und erneuerbare Energietechnologien zu (Ambiguität).

Andere typische Ansatzpunkte, die unter anderem in den Szenarien untersucht werden, sind Veränderungen in der Produktion (z. B. Effizienzsteigerungen) oder Verbesserung des Recyclings und Veränderungen im Konsum. Neben der rein qualitativen Unterscheidung der Szenarien unterscheiden sie sich in den Ambitionsniveaus zur Energie- und Materialeffizienz sowie den Zeitpunkten, wann die jeweiligen Maßnahmen ergriffen werden.



**Abbildung 3-5: CLD mit Ansatzpunkten für Maßnahmen**

Quelle: eigene Darstellung

### 3.1 Die Green-Szenariofamilie

Vor dem Hintergrund der wechselseitigen Abhängigkeiten und der Komplexität wurden in der vorliegenden Studie mehrere Szenarien zur Beschreibung des Lösungsraums und der Handlungsspielräume für den Weg in ein weitestgehend treibhausgasneutrales Deutschland entwickelt.

Die Szenarien zeichnen dabei mögliche Transformationspfade Deutschlands – eingebettet in die Europäische Union (EU) und die Welt – als weiterhin produzierenden Industriestandort im globalen Handel mit einer modernen leistungsfähigen Gesellschaft auf. Die heutigen Strukturen verändern sich nicht fundamental. Innovative Informations- und Telekommunikationstechnologien sind als Ausdruck der zunehmenden Digitalisierung ein fester Bestandteil in Gesellschaft und allen Wirtschaftsbereichen. Die hierfür erforderlichen Infrastrukturen wurden rechtzeitig geplant und umgesetzt.

Klimaschutz, Dekarbonisierung, Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis charakterisieren gesellschaftlichen und industriellen Wandel. Allen Szenarien ist gemein, dass sie Zielszenarien für ein im Jahr 2050 weitestgehend treibhausgasneutrales Deutschland darstellen. Konkret bedeutet dies eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 1990 von mindestens 95 %. Im Transformationspfad wird bis 2030 mindestens das von der Bundesregierung beschlossene Treibhausgasminderungsziel von 55 % gegenüber 1990 erreicht. Wie die Treibhausgasminderung erfolgt, unterscheidet sich in den Szenarien.

Als wesentlicher Einflussparameter wird in allen Szenarien die identische Bevölkerungsentwicklung unterstellt. Deutschland hat derzeit rund 83 Millionen Einwohner



(Statistisches Bundesamt, 2019e). Bevölkerungsprognosen gehen langfristig von einem Bevölkerungsrückgang etwa ab dem Jahr 2020 aus, im Jahr 2060 hätte Deutschland demnach zwischen 67 und 76 Millionen Einwohner, abhängig vom Einwanderungssaldo (Statistisches Bundesamt, 2015a, 2017a). Konkret wird in der vorliegenden Studie die Variante V1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ der 13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung von destatis unterstellt (Statistisches Bundesamt, 2015a). Mit einer Netto-Zuwanderung von 150.000 Menschen pro Jahr bis 2030 und danach jährlich 100.000 Personen, einer Geburtenrate von 1,4 Kindern je Frau sowie einer steigenden Lebenserwartung, leben im Jahr 2050 71,9 Millionen Personen in Deutschland (Dittrich et al., 2020a). Entsprechend werden die kommunalen Infrastrukturen, beispielsweise im Bereich der Wasserver- und -entsorgung, weiterentwickelt. Einhergehend mit dem gesellschaftlichen Willen zur Dekarbonisierung und Ressourcenschonung zeigt sich ein kontinuierlicher Rückgang von Infrastrukturprojekten und die Bauaktivität reduziert sich insgesamt. Dies führt dazu, dass die Flächenneuinanspruchnahme aller Szenarien bis 2050 auf netto Null reduziert wird.

Der Umbau der Energieversorgung erfolgt in allen Szenarien hin zu einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden System, in welchem Sektorkopplung, also die direkte oder indirekte Verwendung von regenerativem Strom zur Wärme- (Power to Heat, PtH), Brennstoff-, Kraftstoff- und Rohstoffbereitstellung (Power to Gas, PtG und Power to Liquid, PtL), die vollständige Substitution fossiler Energieträger gewährleistet. Die Energiewende in den Anwendungsbereichen (Verkehr, Industrie, etc.) geht dabei Hand in Hand mit der Energieversorgung. Die Nutzung von Kernenergie wird vor dem Hintergrund des möglichen Schadensausmaßes auf Mensch und Umwelt nicht als Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung beachtet. Gleichfalls wird in allen Szenarien CCS (Carbon Capture and Storage) nicht berücksichtigt. CCS ist mit Umweltrisiken verbunden (UBA, 2015a), hat eine geringe Akzeptanz in der Bevölkerung und stellt keine langfristige tragfähige Minderungsmöglichkeit in Deutschland dar. Entgegen anderer Szenarien (BDI, 2018; dena, 2018; Öko-Institut e.V., 2015), in denen CCS als Brückentechnik eine Rolle spielt, um die Treibhausgasminderungen in der Industrie zu ermöglichen, sollen in den Szenarien dieser Studie die Investitionen zielgerichtet in die Entwicklung treibhausgasarmer Prozesstechniken und damit langfristig tragfähige Konzepte fließen.

Diese übergreifenden Rahmenbedingungen bzw. Zielsetzungen über alle Szenarien hinweg ermöglichen die Vergleichbarkeit und das Herausarbeiten der Effekte einzelner Einflussparameter auf den Transformationspfad. Die für diese Studie erstellte Green-Szenario-Familie soll insbesondere Einflüsse und Wechselwirkung unterschiedlicher Anstrengungsniveaus im Laufe des Transformationsprozesses hin zur (weitestgehenden) Treibhausgasneutralität (GreenLate, GreenSupreme), Materialeffizienz (GreenMe) sowie zur Verbreitung nachhaltiger Lebensstile (GreenLife) betrachten, siehe Tabelle 3-1.

**Tabelle 3-1: Überblick zu den verschiedenen Green-Szenarien**

	GreenEe	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Treibhausgasminderung 2050	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Ambitionsniveau der Klimaschutzanstrengungen im Transformationspfad (2030 und 2040)	hoch	Mittel	hoch	hoch	Sehr hoch
Endenergiebedarf	niedrig	Hoch	niedrig	Sehr niedrig	Sehr niedrig

	GreenEe	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Rohstoffanspruchnahme	mittel	hoch	niedrig	niedrig	niedrig
Materialeffizienz	hoch	mittel	Sehr hoch	hoch	Sehr hoch
Änderungen der Verhaltensweise <sup>21</sup>	mittel	mittel	mittel	Sehr hoch	Sehr hoch

### 3.2 GreenEe

Die beiden GreenEe-Szenarien stehen für “Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency” und fokussieren die Erschließung der Energieeffizienzpotenziale über alle Anwendungsbereiche hinweg.

Klimaschutz, Dekarbonisierung, konsequente Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis wird im Laufe dieses gesellschaftlichen und industriellen Wandels immer deutlicher und spiegelt sich in den politisch gesetzten Rahmenbedingungen wieder.

Auch international setzt sich dieses Verständnis – wenngleich langsamer – durch, so dass die Entwicklung globaler Märkte für regenerative Energieträger möglich ist und Carbon Leakage keine ausgeprägte Bedrohung der nationalen industriellen Produktion darstellt. Deutschland ist weiterhin eng in den internationalen Handel verflochten. Während beim GreenEe1 die Industrie insgesamt ihre Produktionskapazitäten kontinuierlich steigert und die Exporte weiter ansteigen, erfolgt in GreenEe2 ein ausgeglichenerer globaler Handel, so dass die nationalen Produktionskapazitäten in weiten Bereichen rückläufig sind. Gleichwohl erfolgt u. a. durch steigende Qualität der produzierten Güter und Innovationen weiterhin ein Wirtschaftswachstum.

Die Energieversorgung beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien. Sektorkopplungstechniken ermöglichen die direkte oder indirekte Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien in allen Anwendungsbereichen, wobei durch das konsequente Erschließen von Energieeffizienzpotentialen der Bedarf an Energie reduziert wird. Dort wo technisch möglich, wird erneuerbarer Strom direkt genutzt. Der Ausbau der erneuerbaren Energien und der dafür nötige Netzausbau erfolgt in Deutschland rasch und insbesondere der Stromsektor wird schnell dekarbonisiert, damit die Integration von Sektorkopplungstechniken und Umstrukturierungen in den Anwendungsbereichen Hand in Hand erfolgen kann. Digitalisierung leistet einen wachsenden Beitrag zur intelligenten Verknüpfung und Flexibilisierung von Energieverbrauchern und –erzeugern, so dass Back-up-Kapazitäten zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit minimiert werden. Wie heute werden auch zukünftig vor allem die Brenn- und Kraftstoffe nach Deutschland importiert. Im Jahr 2050 werden ausschließlich regenerative Energieträger importiert.

Die Industrie vollzieht parallel zur Änderung der Energieversorgung eine Umstrukturierung und Erneuerung des Anlagenparks hin zu modernen dekarbonisierten Prozesstechniken. Dazu werden alle Prozesstechniken auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt und PtX-Techniken werden integriert. Dort, wo technisch möglich, wird auf strombasierte Prozesswärmeversorgung (Power to Heat) umgestellt. Die prozessbedingten Emissionen werden auf das derzeit bekannte technische Niveau verringert. Die kontinuierliche Fortsetzung einer ambitionierten Ressourcenschonungspolitik unterstützt den technischen Fortschritt und hebt vielfältige Innovationspotenziale. Dies führt dazu, dass sich der Trend der letzten Jahre

<sup>21</sup> Beispielsweise im Bereich Ernährung, Mobilität, Konsum u. ä..

hinsichtlich der Entwicklung der durchschnittlichen Rohstoffproduktivität langfristig, leicht erhöht bis 2050 fortsetzt. Der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen und Materials substitutionen vor allem im Bereich der metallverarbeitenden sowie chemischen Industrie und im Bausektor führt zu weiteren Einsparungen von Primärrohstoffen und damit zu weiterer Steigerung der Rohstoffeffizienz in einzelnen Industrien. Auch international wird zunehmend eine Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Implementierung entsprechender Politiken und Ziele ambitioniert vorangetrieben. Der hierdurch beschleunigte technologische Fortschritt führt dazu, dass der Stand der technischen Entwicklung in 2050 innerhalb Europas vergleichbar ist. International verringert sich der Abstand deutlich, so dass global der Stand der technischen Entwicklung in 2050 bezogen auf die wesentlichen Entwicklungen der Transformation des Energiesystems und der Steigerung der Ressourceneffizienz dem des Jahres 2040 in Deutschland entspricht.

Gebäude sind bis zum Jahr 2050 stark modernisiert und saniert, so dass der Energiebedarf sich im erheblichen Maße reduziert und vollständig durch erneuerbare und effiziente Wärmeversorgung mit Wärmepumpen und Wärmenetzen gedeckt wird. Demografischer Wandel und Bevölkerungsentwicklung in Deutschland führen zu einem leichten Anstieg der Pro-Kopf-Wohnfläche bis 2030, die absolute Wohnfläche in 2050 entspricht der des Jahres 2010.

Die Umsetzung von Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung durch die Gesellschaft ist im hohen Maße gegeben. Elektromobilität prägt 2050 das alltägliche Bild der Mobilität. Elektrofahrzeuge im Individualverkehr und öffentlichen Verkehr sind im Laufe des Transformationspfades schnell Selbstverständlichkeiten. Entwicklung und infrastruktureller Ausbau für hybride Oberleitungs-Lkw werden frühzeitig angegangen, so dass auch im Straßenschwerlastverkehr bis 2050 eine hohe Integration von Elektromobilität gewährleistet wird. Verbrennungskraftmaschinen mit treibhausgasneutralen Kraftstoffen werden im Wesentlichen im Flug- und Seeverkehr und nur noch im geringen Maße im Straßenverkehr eingesetzt.

Der gesellschaftliche Konsens zur Dekarbonisierung ermöglicht ebenfalls den Wandel in der Landwirtschaft. Die gesünderen Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung führen zu reduzierten Tierbeständen in Deutschland. In GreenEe2 wird darüber hinaus der Exportüberschuss an Fleisch und Fleischprodukten reduziert und damit einhergehend die Tierbestände und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen in Deutschland. Die Emissionen verringert die moderne und nachhaltige Landwirtschaft zudem durch technische Maßnahmen wie verminderten Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement. Landwirtschaftlich genutzten Fläche auf trockengelegten Mooren werden bis 2050 sukzessive renaturiert und der Torfabbau vollständig beendet. In Deutschlands Wäldern wird die Entwicklung zu stabilen Mischwäldern konsequent fortgesetzt und somit der Wald als Netto-Kohlenstoffsенke erhalten. Biodiversitätsschutz wird verstärkt in die Waldbewirtschaftung integriert, unterstützt durch die Ausweitung von Prozessschutzflächen mit natürlicher Waldentwicklung.

### **3.3 GreenLate**

GreenLate ("Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Late transition"), zeichnet einen weiteren möglichen Transformationspfad Deutschlands als weiterhin exportorientierten Industriestandort mit einer modernen leistungsfähigen Gesellschaft auf. Durch den verzögerten Anstieg des Ambitionsniveaus bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Szenario verdeutlicht GreenLate, welche Herausforderungen verspätetes Handeln bei der Erreichung einer THG-Minderung um 95 % bis 2050 mit sich bringt.

Das gemeinschaftliche Verständnis und der Wille zur Umsetzung von Klimaschutz, Dekarbonisierung und mehr Ressourcenschutz muss anfänglich noch stärker befördert werden. Die erforderlichen Maßnahmen und Investitionen, um eine THG-Minderung um rund 95 % gegenüber 1990 zu erreichen, müssen daher Größtenteils in einem kürzeren Zeitraum und später realisiert werden. Dies erfordert insbesondere am Ende der ersten Jahrhunderthälfte enorme strukturelle Änderungen verbunden mit sehr hoher Investitionsbereitschaft im gesellschaftlichen und industriellen Alltag. Das Ambitionsniveau zum Heben von Energie- und Materialeffizienzpotentialen fällt dabei insgesamt geringer aus. Der Trend, dass erforderliche hohe Ambitionsniveau beim Klima- und Ressourcenschutz zu einem späteren Zeitpunkt wirksam umzusetzen, erfolgt auch auf internationaler Ebene.

Die Energieversorgung beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien. Geringeres gesellschaftliches Verständnis für das Heben von Material- und Energieeffizienzpotentialen führt zu einem hohen Energiebedarf. Durch das verspätete Handeln werden Entwicklung und Einführung THG-extensiver Techniken in den Anwendungsbereichen verschlafen. Nur in Anwendungsbereichen mit kurzen Erneuerungszyklen und Bereichen mit hohen Investitionsanreizen können noch hohe Durchdringungen direkt strombasierter und damit systemisch effizienter Techniken bis 2050 realisiert werden. In weiten Bereichen sind konventionelle Energietechniken nach wie vor zu hohen Anteilen im Einsatz, so dass der Bedarf an importierten, regenerativ erzeugten strombasierten Energieträgern deutlich erhöht ist. Die Integration der erneuerbaren Energien schreitet in der Stromversorgung voran.

In der Industrie werden bis 2030 vor allem Effizienzpotentiale erschlossen. Die Umstrukturierung und Erneuerung des Anlagenparks erfolgt insbesondere am Ende der ersten Jahrhunderthälfte. Zwar werden bis zum Jahr 2050 alle Prozesstechniken auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt, dennoch werden Forschung und Entwicklung THG-extensiver Techniken größtenteils nicht frühzeitig angestoßen, so dass die Umstrukturierung hin zu modernen, effizienten, dekarbonisierten Prozesstechniken bis 2050 nicht abgeschlossen ist. Vielmehr wird auf bestehende Techniken zurückgegriffen, so dass ein erhöhter Bedarf an regenerativen strombasierten Energieträgern für die Versorgung der industriellen Bedarfe besteht. Nur Branchen mit kurzen Erneuerungszyklen können noch auf direkt strombasierte und damit systemische effiziente Endenergieträger umstellen. Es besteht ein gemeinschaftliches Verständnis, dass CCS-Techniken keine nachhaltige und dauerhafte Option zur Minderung der prozessbedingten Emissionen darstellt, so dass Investitionen nicht bei der Entwicklung dieser Brückentechnologie versenkt werden, sondern zielgerichtet eingesetzt werden. Industriezweige, in denen keine Alternativen für die notwendigen prozessbedingten THG-Minderungen bestehen, zum Beispiel in der Stahlindustrie, erkennen diese Erfordernisse und handeln entsprechend, so dass der Technikwandel realisiert wird. Das geringere gesellschaftliche Verständnis für das Heben von Material- und Energieeffizienzpotentialen führt auch zu einem verringerten Innovationsdruck in der Produktion. Hierdurch werden im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien Rohstoffeffizienz- und Recyclingpotentiale nur zum Teil ausgeschöpft. Insgesamt ergibt sich hierdurch eine jährliche durchschnittliche Steigerung der Rohstoffproduktivität bis 2050, die unter dem Trend des letzten Jahrzehnts liegt. Auch international werden Rohstoffeffizienz und Materialsubstitution nur verzögert umgesetzt, sodass der Stand der technischen Entwicklung in 2050 innerhalb Europas weiterhin vergleichbar ist. International verringert sich der Abstand dennoch deutlich, sodass global der Stand der technischen Entwicklung in 2050 etwa dem des Jahres 2040 in Deutschland entspricht.

Das verzögerte gemeinschaftliche Verständnis und der Wille zur Umsetzung von Klima- und Ressourcenschutz führen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien zu einem spürbar geringeren modernisierten und sanierten Gebäudebestand. Auch hier sind konventionelle dezentrale

Heiztechniken, die heute im Wesentlichen das Bild prägen noch im Einsatz. Der Anteil der Bauweisen sowie der verwendeten Baumaterialien sind mit den heutigen vergleichbar. Auch hinsichtlich der beheizten Wohnfläche zeigt sich das geringere Verständnis für Klima- und Ressourcenschutz. Diese liegt trotz identischer, rückläufiger Bevölkerungsentwicklung höher im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien.

Die Akzeptanz und vermehrte Umsetzung von Verkehrsvermeidung und -verlagerung durch die Bevölkerung über den heutigen Trend hinaus erfolgt erst am Ende der ersten Jahrhunderthälfte. Gleichermaßen verzögert sich die Integration der Elektromobilität im Individualverkehr und öffentlichen Verkehr, auch wenn die Elektromobilität bis 2050 den Fahrzeugbestand dominiert. Im Straßenschwerlastverkehr ist die Umstrukturierung bis 2050 nicht abgeschlossen, weil infrastrukturelle Ausbauten, Forschung und Entwicklung in die Elektrifizierung verschlafen werden. Dementsprechend ist der Schwerlastverkehr 2050 von Verbrennungskraftmaschinen geprägt. Die Kombination aus dem Festhalten an konventionellen Techniken, geringeren Fortschritt in effizientere Antriebstechniken und geringer Verkehrsvermeidung und -verlagerung führt zu hohen regenerativen Kraftstoffbedarfen.

Auch die Umstrukturierung der Landwirtschaft hin zu einer emissionsarmen, modernen und nachhaltigen Landwirtschaft erfolgt verzögert. Technische Treibhausgasminderungsmaßnahmen, wie reduzierter Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement, sowie die sukzessive Renaturierung der Moore werden zu Beginn nur langsam und dann größtenteils schneller umgesetzt. Die Nachfrage an nachhaltigen regionalen landwirtschaftlichen Produkten liegt im gesamten Transformationspfad deutlich unter dem Niveau der anderen Szenarien. Der Trend zu gesünderen Ernährungsgewohnheiten nimmt in der Bevölkerung erst ab der Mitte der ersten Jahrhunderthälfte Fahrt auf und führt so zu reduzierten Tierbeständen, die dennoch über denen der GreenEe-Szenarien liegen. Der bereits heute angestoßene Waldbau und die damit verbundenen Änderungen der Waldbewirtschaftung ermöglichen weiterhin eine Netto-Kohlenstoffsенке und verstärkten Biodiversitätsschutz. Wie in den GreenEe-Szenarien sind Waldbesitzer der öffentlichen Hand hierbei verstärkt Vorreiter und Impulsgeber.

### **3.4 GreenMe**

GreenMe („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Material efficiency“) setzt wie die GreenEe-Szenarien im Wesentlichen auf technische Maßnahmen bei der Transformation Deutschlands. Neben der Energieeffizienz wird hier im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien nochmals eine Steigerung der Rohstoffeffizienz über alle Anwendungsbereiche hinweg fokussiert. Klimaschutz, Dekarbonisierung, konsequente Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis wird im Laufe dieses gesellschaftlichen und industriellen Wandels immer deutlicher und spiegelt sich in den politisch gesetzten Rahmenbedingungen wieder.

Auch international setzt sich dieses Verständnis in hohem Tempo durch, so dass bis 2050 global ein vergleichbarer Stand der technologischen Entwicklung vorherrscht. Dies ermöglicht die Entwicklung globaler Märkte für regenerative Energieträger und Carbon Leakage stellt somit keine ausgeprägte Bedrohung der nationalen industriellen Produktion dar. Deutschland ist weiterhin eng, jedoch mit einer im Vergleich zu heute deutlich ausgeglicheneren Handelsbilanz, in den internationalen Handel verflochten. Dementsprechend reduzieren sich wie bereits im GreenEe2 in weiten Bereichen die nationalen Produktionskapazitäten. Gleichwohl erfolgt u. a. durch steigende Qualität der produzierten Güter, hohem Innovationspotenzial der Wirtschaft und dem Ausbau des Dienstleistungssektors weiterhin ein Wirtschaftswachstum.



Die Transformation der Energieversorgung erfolgt prinzipiell identisch zu GreenEe2 und beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien, inklusive des Imports regenerativer Energieträger. Das bedeutet, dass effiziente Sektorkopplungstechniken die direkte oder indirekte Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien in allen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen und dort, wo technisch möglich, erneuerbarer Strom direkt genutzt wird. Neben der konsequenten Erschließung von Energieeffizienzpotentialen werden in der Energieversorgung vor allem Techniken mit geringem Primärrohstoffbedarf eingesetzt. So findet beispielsweise bei der Photovoltaik ein stärkerer Ausbau auf Dachflächen mit Dünnschichtzellen statt. Auch werden Fundamente, Aufständierungen, Windtürme u.ä. robust und langlebig ausgeführt, so dass deren Lebensdauer deutlich erhöht werden kann. Materialsubstitutionen bei Leitungen und Strommasten reduzieren die Rohstoffaufwendungen zusätzlich.

Flankiert von einer ambitionierten Ressourcenschonungspolitik befördert das gesamtgesellschaftliche Verständnis von Klima- und Ressourcenschutz das Innovationspotenzial der Industrie und einer entsprechenden Steigerung der Rohstoffeffizienz. Zusammen mit der Ausschöpfung des ökologisch-technischen Recyclingpotenzials, ausgeprägter Materialsubstitution und dem Einsatz innovativer Materialien wie Textilbeton kann so der Trend zur durchschnittlichen Steigerung der Rohstoffproduktivität der letzten Jahre bis 2050 übertroffen werden. Die hohe Ressourceneffizienz in den Industrien sorgt somit für eine anhaltend hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft im produzierenden Gewerbe. Zugleich vollzieht die Industrie parallel zur Änderung der Energieversorgung eine Umstrukturierung und Erneuerung des Anlagenparks hin zu modernen dekarbonisierten Prozesstechniken. Dazu werden alle Prozesstechniken auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt und die Integration von PtX-Techniken, zur Prozesswärmeversorgung insbesondere Power to Heat, erfolgt. Die prozessbedingten Emissionen werden auf das derzeit bekannte technische Niveau verringert.

Rohstoffeffizientes Bauen ist bei neuen Gebäuden ebenso verbreitet wie ein hoher Anteil an Wohnhäusern in Holzbauweisen. Gebäude im Bestand sind bis zum Jahr 2050 stark modernisiert und saniert, so dass der Energiebedarf sich im erheblichen Maße reduziert und vollständig durch erneuerbare und effiziente Wärmeversorgung mit Wärmepumpen und Wärmenetze gedeckt wird. Dabei wird in hohem Maße auf Dämmmaterialien aus natürlichen Rohstoffen und materialeffiziente Fenster gesetzt. Demografischer Wandel und Bevölkerungsentwicklung führen wie in den GreenEe-Szenarien zu einem leichten Anstieg der Pro-Kopf-Wohnfläche, die ab 2030 jedoch nahezu konstant bleibt. Somit entspricht die beheizte Wohnfläche in absoluten Werten in 2050 derjenigen des Jahres 2010.

Elektromobilität prägt 2050 das alltägliche Bild der Mobilität und Aspekte der Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung sind in der Gesellschaft fest verankert. Elektrofahrzeuge im Individualverkehr und öffentlichen Verkehr sind im Laufe des Transformationspfades schnell Selbstverständlichkeiten. Durch den engmaschigen Ausbau der Ladeinfrastruktur gewinnen Fahrzeuge mit kleineren und somit rohstoffsparenden Batterien an Bedeutung. Zudem führt innovativer Leichtbau zu geringeren Karosseriegewichten. Entwicklung und infrastruktureller Ausbau für hybride Oberleitungs-Lkw werden frühzeitig angegangen, so dass auch im Straßenschwerlastverkehr bis 2050 eine hohe Integration von Elektromobilität, ab 2040 mit zunehmendem Anteil vollelektrischer Fahrzeuge, gewährleistet wird. Die Anstrengungen bei der Erhöhung der Ressourceneffizienz mindern zusätzlich die Gütermengen und in Folge die benötigte Güterverkehrsleistung. Wie in den GreenEe-Szenarien werden Verbrennungskraftmaschinen mit treibhausgasneutralen Kraftstoffen im Wesentlichen im Flug- und Seeverkehr und nur noch im geringen Maße im Straßenverkehr eingesetzt.

Der gesellschaftliche Konsens zur Dekarbonisierung ermöglicht den Wandel in der Landwirtschaft. Die Emissionen reduziert die moderne und nachhaltige Landwirtschaft im Wesentlichen durch technische Maßnahmen, wie reduzierter Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement. Die gesünderen Ernährungsgewohnheiten in und außerhalb Deutschlands führen wie in GreenEe2 zu einer Reduktion des Exportüberschusses an Fleisch und Fleischprodukten. Hierdurch werden die Tierbestände in Deutschland weiter reduziert und es gelingt weitere Emissionen im Vergleich zu GreenEe1 und GreenLate bis 2050 einzusparen. Landwirtschaftlich genutzten Fläche auf trockengelegten Mooren werden bis 2050 sukzessive renaturiert und der Torfabbau vollständig beendet. In Deutschlands Wäldern wird die Entwicklung zu stabilen Mischwäldern konsequent fortgesetzt und somit der Wald als Netto-Kohlenstoffsенke erhalten. Biodiversitätsschutz wird verstärkt in die Waldbewirtschaftung integriert, unterstützt durch die Ausweitung von Prozessschutzflächen mit natürlicher Waldentwicklung.

### **3.5 GreenLife**

Das Szenario GreenLife („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – lifestyle changes“) ist über die technischen Maßnahmen in GreenEe2 zur Treibhausgasminderung und Ressourcenschonung hinaus durch den Willen jedes Einzelnen für eine ambitionierte und umweltbewusste Lebensweise geprägt. Bereits heute erkennbare Trends einer nachhaltigen Lebensweise sowie entsprechende Nischenentwicklungen sind durch ein steigendes Umweltbewusstsein und das Wissen über ein notwendiges schnelles Handeln zügig in den Mainstream übergegangen. Legislative und förderpolitische Maßnahmen unterstützen diese Entwicklung, ohne dass sie als Zwang oder Wandel von oben verstanden wird. Dieser mögliche Transformationspfad Deutschlands wird somit neben Klimaschutz, Ressourcenschutz, Dekarbonisierung sowie konsequente Energie- und Materialeinsparung durch umweltbewusstes und nachhaltiges Verhalten der Bevölkerung geprägt.

Auch international hat ein starkes Verständnis für ambitionierten Klima- und Ressourcenschutz Raum gegriffen, so dass bis 2050 global ein vergleichbarer Stand der technologischen Entwicklung vorherrscht. Deutschland ist weiterhin eng, jedoch mit einer im Vergleich zu heute deutlich ausgeglicheneren Handelsbilanz, in den internationalen Handel verflochten. Einhergehend mit einem veränderten Konsumverhalten hin zu regionalen, langlebigeren und reparaturfähigen Produkten und einem ausgeprägten Dienstleistungssektor reduzieren sich wie bereits im GreenEe2 in weiten Bereichen die nationalen Produktionskapazitäten. Insgesamt kann dennoch ein – vor allem qualitatives – Wirtschaftswachstum erreicht werden.

Energieeffizienzpotentiale werden sowohl in der Energiebereitstellung als auch in der Energienachfrage konsequent umgesetzt, wodurch insgesamt der Energiebedarf sinkt. Der Umbau der Energieversorgung erfolgt prinzipiell identisch zu GreenEe2 und beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien, inklusive des Imports regenerativer Energieträger. Effiziente Sektorkopplungstechniken und die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom – wo technisch möglich – sind umgesetzt. Die notwendige Entwicklung globaler Märkte für regenerative Energieträger ist erfolgt. Carbon Leakage stellt somit keine ausgeprägte Bedrohung der nationalen industriellen Produktion dar.

Die steigende Nachfrage nach langlebigen und reparierbaren Produkten mit geringen Umweltwirkungen, flankiert von entsprechenden Förderpolitiken, beflügelt das Innovationspotenzial der Industrie. Dies führt dazu, dass sich der Trend der letzten Jahre hinsichtlich der Entwicklung der durchschnittlichen Rohstoffproduktivität bis 2050 fortsetzt. Entwicklungen wie die zunehmende Digitalisierung oder Trends wie verpackungsarmes Einkaufen oder papierarmes Büro führen zur Umstrukturierung einzelner Branchen. Parallel zur



Änderung der Energieversorgung vollzieht die Industrie eine Umstrukturierung und Erneuerung des Anlagenparks hin zu modernen dekarbonisierten Prozesstechniken. Dazu werden alle Prozesstechniken auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt und die Integration von PtX-Techniken zur Prozesswärmeversorgung, insbesondere Power to Heat, erfolgt. Die prozessbedingten Emissionen werden auf das derzeit bekannte technische Niveau verringert.

Der Wille jedes Einzelnen für eine ambitionierte und umweltbewusste Lebensweise zeigt sich ebenfalls in der Nachfrage nach Wohnraum und somit in der Entwicklung des Gebäudebestands. Rohstoffeffizientes Bauen ist bei neuen Gebäuden ebenso verbreitet wie ein steigender Anteil an Wohnhäusern in Holzbauweisen. Es setzt sich eine modulare Bauweise durch, die eine relativ flexible Nutzung der Wohnfläche ermöglicht. Auch Altbauwohnung und Einfamilienhäuser werden verstärkt umgebaut mit dem Ziel kleinerer Wohneinheiten bzw. einen höheren Grad an Flexibilisierung zu erhalten. Formen des gemeinschaftlichen Wohnens finden einen breiten gesellschaftlichen Zuspruch. Hierdurch, in Kombination mit dem anhaltenden Trend zur Urbanisierung, nimmt der Anteil an Mehrfamilienhäusern im Gebäudebestand deutlich zu. Insgesamt reduziert sich somit sowohl der Pro-Kopf-Wohnflächenbedarf als auch die absolute Wohnfläche. Damit einhergehend nimmt die Neubauaktivität für Infrastruktur insgesamt ab. So gelingt es, die Flächenneuanspruchnahme bereits bis 2030 auf 10 ha/Tag und bis 2050 auf null zu reduzieren. Gebäude im Bestand sind bis zum Jahr 2050 stark modernisiert und saniert, sodass der Energiebedarf sich erheblich reduziert und vollständig durch erneuerbare und effiziente Wärmeversorgung mit Wärmepumpen und Wärmenetze gedeckt wird.

Die ambitionierte und umweltbewusste Lebensweise zeigt sich besonders deutlich im Mobilitätsverhalten der Gesellschaft. Nationale Flugreisen finden immer weniger Akzeptanz und innerdeutsche Fernreisen werden in 2050 überwiegend mit bodengebundenen Verkehrsmitteln unternommen sowohl privat als auch geschäftlich. Auch internationale Urlaubsflüge verlieren an Bedeutung, sodass der inländische Fernreiseverkehr zunimmt. Insgesamt steigt somit der Flugverkehr bis 2050 nur marginal gegenüber 2010. Auch der zunehmende Trend der Urbanisierung zeigt sich in der Mobilität. Denn insbesondere im städtischen Raum verliert der motorisierte Individualverkehr rasch an Bedeutung. Fuß- und Radverkehr nehmen ebenso deutlich zu wie die Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs ergänzt um Car- und Ridesharing. Dies führt dazu, dass bis 2050 im urbanen Raum der Besitz des eigenen Pkw eine Seltenheit geworden ist. Wie in den GreenEe-Szenarien und GreenMe prägt Elektromobilität 2050 das alltägliche Bild der Mobilität. Elektrofahrzeuge im Individualverkehr und öffentlichen Verkehr sind im Laufe des Transformationspfades schnell Selbstverständlichkeiten und aufgrund des zunehmenden Ridesharings erneuert sich der Bestand entsprechend schnell.

Umwelt- und Klimaschutz sowie ein gestiegenes Gesundheitsbewusstsein sind wichtige Leitmotive in der Ernährung. Lebensmittelabfälle werden möglichst vermieden und eher regionale und saisonale Lebensmittel verarbeitet. Eine hauptsächlich pflanzliche Ernährungsweise ist zunehmend verbreitet, wodurch sich der Fleisch- und Milchkonsum deutlich reduziert. Da sich diese Sichtweise ebenso international verstärkt durchsetzt, erfolgt eine Reduktion des Exportüberschusses an Fleisch und Fleischprodukten. Somit nehmen die Tierbestände in Deutschland kontinuierlich ab. Wie in den anderen Szenarien reduziert die moderne und nachhaltige Landwirtschaft zudem ihre Emissionen durch technische Maßnahmen wie reduziertem Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement. Darüber hinaus werden bisher landwirtschaftlich genutzte Flächen auf trockengelegten Mooren bis 2050 sukzessive renaturiert und der Torfabbau bis 2040 vollständig beendet. In Deutschlands Wäldern wird die Entwicklung zu stabilen Mischwäldern konsequent fortgesetzt und somit der Wald als Netto-Kohlenstoffsенке erhalten. Biodiversitätsschutz wird verstärkt in die

Waldbewirtschaftung integriert, unterstützt durch die Ausweitung von Prozessschutzflächen mit natürlicher Waldentwicklung.

### 3.6 GreenSupreme

Green Supreme steht für “Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Minimizing future GHG emissions and raw material consumption”. Der hier gezeigte mögliche Wandel ist von Beginn an durch ein ausgeprägtes und ambitioniertes gemeinschaftliches Verständnis zur Umsetzung von Klimaschutz und Ressourcenschutz, Dekarbonisierung sowie konsequente Energieeinsparung in Deutschland und international geprägt. Schnell integrierte umweltpolitisch verursachergerechte Rahmenbedingungen setzen frühzeitig die richtigen Anreize über alle Emissionsquellbereiche hinweg. Damit wird insbesondere im Zeitraum bis 2040 eine deutliche Treibhausgasreduktion erreicht und ein fundamentaler Beitrag geleistet, um die kumulierten Emissionen zu reduzieren und einem nach IPCC-globalen 1,5 °C-Transformationspfad (IPCC, 2018a) gerecht zu werden.

Die höchsten Treibhausgasminderungswirkungen werden bei der Substitution der fossilen Stromerzeugung erreicht. Dementsprechend erfolgt bereits bis 2030 ein Ausstieg aus der Kohleverstromung in Deutschland. Der Anteil erneuerbarer Energien in der nationalen Stromversorgung steigt deutlich schneller als in den anderen Szenarien, um einen substanziellen Beitrag zur Minderung der kumulierten Emissionen zu leisten. Die Energieversorgung beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien und ähnelt strukturell den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife. Das bedeutet, dass durch konsequentes Erschließen von Energieeffizienzpotentialen (wie GreenEe-Szenarien) und dem nachhaltigen effizienteren Handeln der Bevölkerung (wie in GreenLife) der Bedarf an Energie deutlich reduziert wird und die Integration effizienter und rohstoffarmer Sektorkopplungstechniken in allen Anwendungsbereichen erfolgt. Wie in GreenMe kommen vor allem Techniken mit geringem Primärrohstoffbedarf sowohl in der Energieversorgung als auch bei den Energieanwendungen zum Einsatz. Hand in Hand erfolgt neben der raschen Dekarbonisierung des Stromsektors die Integration von Sektorkopplungstechniken in den Anwendungsbereichen. Der hierfür notwendige rohstoffarme schnelle Netzausbau gewährleistet die erforderliche Digitalisierung und den schnell wachsenden Beitrag zur intelligenten Verknüpfung und Flexibilisierung von Energieverbrauchern und -erzeugern. Brenn- und Kraftstoffe werden 2050 wie heute im Wesentlichen importiert und basieren ausschließlich auf regenerativen Energieträgern.

Vor dem Hintergrund der hohen Treibhausgasemissionen bei der Kohlenutzung erfolgt nach dem Ausstieg aus der Kohleverstromung ein vollständiger Ausstieg aus der energetischen Kohlenutzung bis 2040. Dies bedeutet, dass einzelne Branchen (wie beispielsweise die Stahlindustrie), die heute hauptsächlich Kohle als Energieträger einsetzen, eine im Vergleich zu den anderen Szenarien beschleunigte Umstrukturierung vollziehen. Alle industriellen Prozesstechniken werden auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt. Dabei erfolgt dort – wo technisch möglich – eine Umstellung der Prozesswärmeversorgung strombasiert (Power to Heat). Die prozessbedingten Emissionen werden auf das derzeit bekannte technische Niveau verringert. Flankiert von entsprechenden Förderpolitiken führt die steigende Nachfrage nach langlebigen, reparierbaren und rohstoffeffizienten Produkten mit geringen Umweltwirkungen zu erheblichen Innovationen in der Industrie. Zunehmende Digitalisierung, verpackungsarmes Einkaufen, papierarmes Büro, Ausschöpfung des ökologisch-technischen Recyclingpotenzials, ausgeprägte Materialsubstitution und der Einsatz innovativer Materialien wie Textilbeton prägen darüber hinaus Produktion und Nachfrage. Hierdurch kann der Trend zur

durchschnittlichen Steigerung der Rohstoffproduktivität der letzten Jahre bis 2050 übertroffen werden.

Deutschland ist weiterhin eng mit einer im Vergleich zu heute deutlich ausgeglicheneren Handelsbilanz in den internationalen Handel verflochten. Einhergehend mit dem gesellschaftlichen Wandel, veränderten Konsumverhalten und innovativen Produkten und Prozessen erfolgt im Wesentlichen ein qualitatives Wachstum einzelner Branchen und Sektoren. Dieses wird aber durch rückläufige Entwicklungen in anderen Bereichen kompensiert. Das bedeutet, dass ab 2030 in Deutschland wie im heutigen Japan zwar ein durchschnittliches Null-Wachstum der Gesamtwirtschaft erfolgt, aber dennoch das Pro-Kopf Bruttoinlandsprodukt im Vergleich zu heute weiter ansteigt.

Bis zum Jahr 2050 verändert sich die Gebäudestruktur maßgeblich. Die Gebäude benötigen durch ambitionierte Neubaustandards, Modernisierungen und Sanierungen deutlich weniger Energie im Vergleich zu heute und werden vollständig durch erneuerbare Energien versorgt (wie in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife). Dämmmaterialien aus natürlichen Rohstoffen, materialeffiziente Fenster und Holzbauweisen kommen vermehrt zum Einsatz. Die modulare Bauweise sowie der Umbau von Altbauwohnung und Einfamilienhäuser hin zu kleineren Wohneinheiten ermöglichen wie im GreenLife-Szenario eine flexiblere Nutzung der Wohnfläche. Formen des gemeinschaftlichen Wohnens und der anhaltende Trend zur Urbanisierung führen zu einem steigenden Anteil an Mehrfamilienhäusern. Insgesamt reduzieren sich der Pro-Kopf-Wohnflächenbedarf und die absolute Wohnfläche. Damit einhergehend nimmt die Neubauaktivität bei der kommunalen Infrastruktur insgesamt ab. So gelingt es die Flächenneuinanspruchnahme bereits bis 2030 auf 10 ha/Tag wie in GreenLife zu reduzieren, während alle anderen Szenarien hier nur eine Reduktion auf 20 ha/Tag erreichen.

Das ambitionierte Umweltbewusstsein jedes Einzelnen beflügelt das Voranschreiten hin zu einer modernen, innovativen Mobilität. So werden flankiert durch entsprechende Rahmenbedingungen weniger Flugreisen getätigt. Dies betrifft neben dem privaten Flugverkehr auch die Geschäftsreisen, welche durch Voranschreiten der Digitalisierung und verbesserte internationale Kommunikation unterstützt werden. Im Gegenzug steigt der bodengebundene inländische Fernreiseverkehr und der nationale Tourismussektor geht gestärkt aus diesem Wandel hervor. Identisch zum Umdenken in GreenLife steigt der Flugverkehr bis 2050 so nur marginal gegenüber 2010. Dementsprechend sinken die erforderlichen treibhausgasneutralen Treibstoffbedarfe deutlich. Auch die städtische Mobilität verändert sich. Durch Urbanisierung, mehr Fuß- und Radverkehr, gut vernetzten öffentlichen Nahverkehr und Car- und Ridesharing verliert der motorisierte Individualverkehr wie in GreenLife rasch an Bedeutung. Dies führt bis 2050 wie in GreenLife zum immer weniger im Privatbesitz befindlichen Pkw im urbanen Raum. Die Ressourceneffizienzsteigerungen führen zu einer Verringerung der Gütermengen und in der Folge zu sinkendem Güterverkehr. Wie schon in den GreenEe-Szenarien prägt Elektromobilität 2050 das alltägliche Straßenbild, auch im Schwerlastverkehr. Verbrennungskraftmaschinen mit treibhausgasneutralen Kraftstoffen finden sich nur noch wenige im Straßenverkehr. Innovativer Leichtbau und geringe Karosseriegewichte im Fahrzeugbau wie im GreenMe-Szenario sowie der infrastrukturelle Ausbau für hybride Oberleitungs-Lkw und Elektroautos sind im Laufe des Transformationspfades schnell Selbstverständlichkeiten.

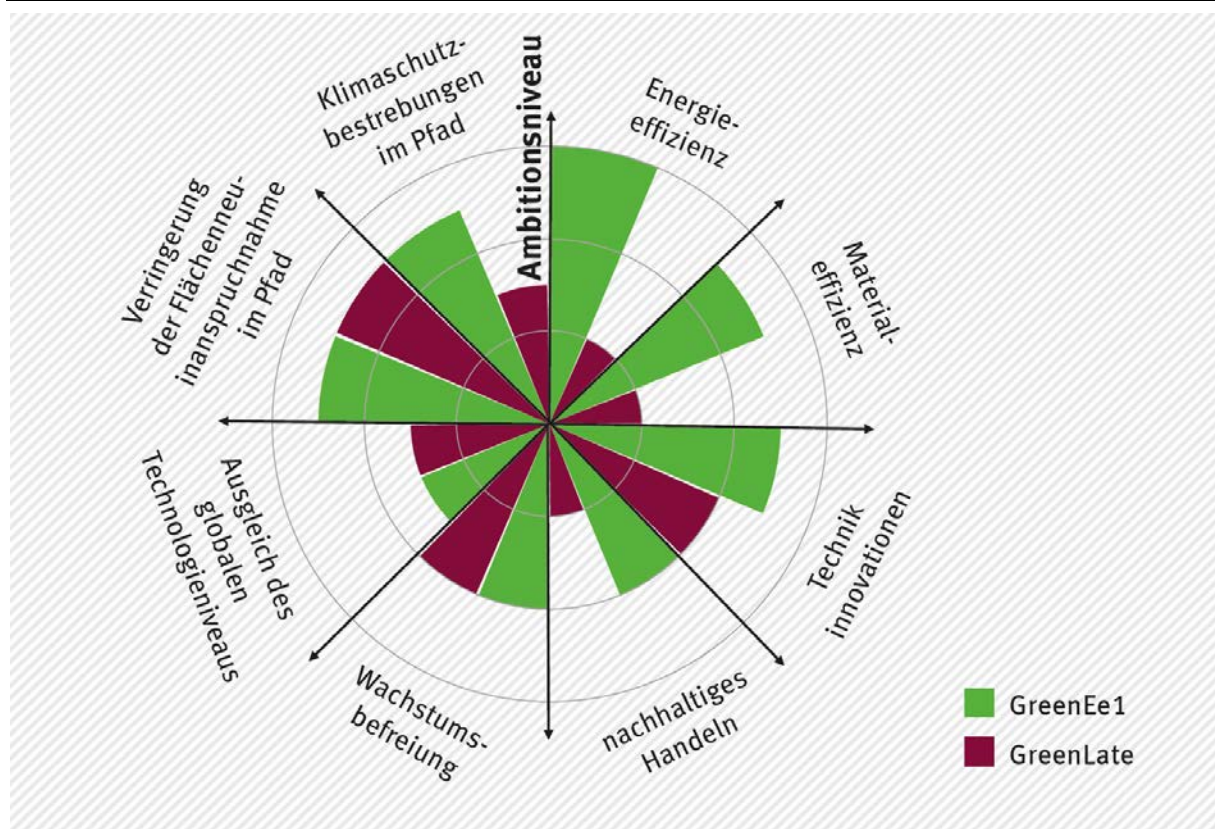
Im Bereich Landwirtschaft bewirkt wie in GreenLife das ambitionierte Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein jedes Einzelnen den Wechsel zu nachhaltigeren, regionalen und saisonalen Lebensmitteln, die Vermeidung von Lebensmittelabfällen und eine Reduktion des Fleisch- und Milchkonsums und damit verbunden der Tierbestandszahlen in Deutschland. Im Sinne des Szenariogrundgedankens, die kumulierten Emissionen zu reduzieren, erfolgt die Reduktion leicht beschleunigt im Vergleich zu GreenLife. Kombiniert mit technischen

Maßnahmen in der Tierhaltung, dem Ackerbau sowie der Renaturierung von trockengelegten Mooren bis 2050 und dem Ausstieg aus dem Torfabbau bis 2040 gelingt die Transformation hin zu einer nachhaltigen Landwirtschaft. Die nachhaltige Waldbewirtschaftung unter den Aspekten der Biodiversität, Ausweitung von Prozessschutzflächen und nachhaltiger stofflicher Nutzung wie im GreenMe-Szenario führt zu einer natürlichen Waldentwicklung hin zu stabilen Mischwäldern in Deutschland, deren Netto-Kohlenstoffsенке erhalten wird.

### 3.7 Zusammenfassung der Green-Szenariofamilie

Die beschriebenen Szenarien machen deutlich, dass für den Erkenntnisgewinn immer nur einzelne strukturelle Parameter verändert wurden. So charakterisieren die Szenarien GreenEe1 und GreenLate weiterhin insgesamt steigende Produktionskapazitäten und Exporte. Das Wirtschaftswachstum beträgt durchschnittlich 0,7 % pro Jahr. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich im Ambitionsniveau zur Treibhausgasminderung im Transformationspfad sowie zur Energie- und Materialeffizienzsteigerung. So werden in GreenLate auch langfristig konventionelle Techniken wie Verbrennungsmotoren im Schwerlasttransport oder Gasverbrennungstechniken eingesetzt und die systemisch energetisch effizienten Techniken wie Elektromobilität und Power to Heat sind weniger integriert. Wesentliches Charakteristikum von GreenLate ist ebenfalls, dass zwar 2030 eine Treibhausgasminderung um 55 % gegenüber 1990 erreicht wird, aber erst in der Dekade nach 2040 nochmal eine deutliche Steigerung der Klimaschutzmaßnahmen und Technikinnovationen erfolgt, um die Treibhausgasminderung um 95 % bis 2050 sicher zu erreichen. Die Eigenschaften beider Szenarien sind vergleichend in Abbildung 3-6 zu sehen.

**Abbildung 3-6: Vergleich der charakteristischen Einflussfaktoren für GreenEe1 und GreenLate**

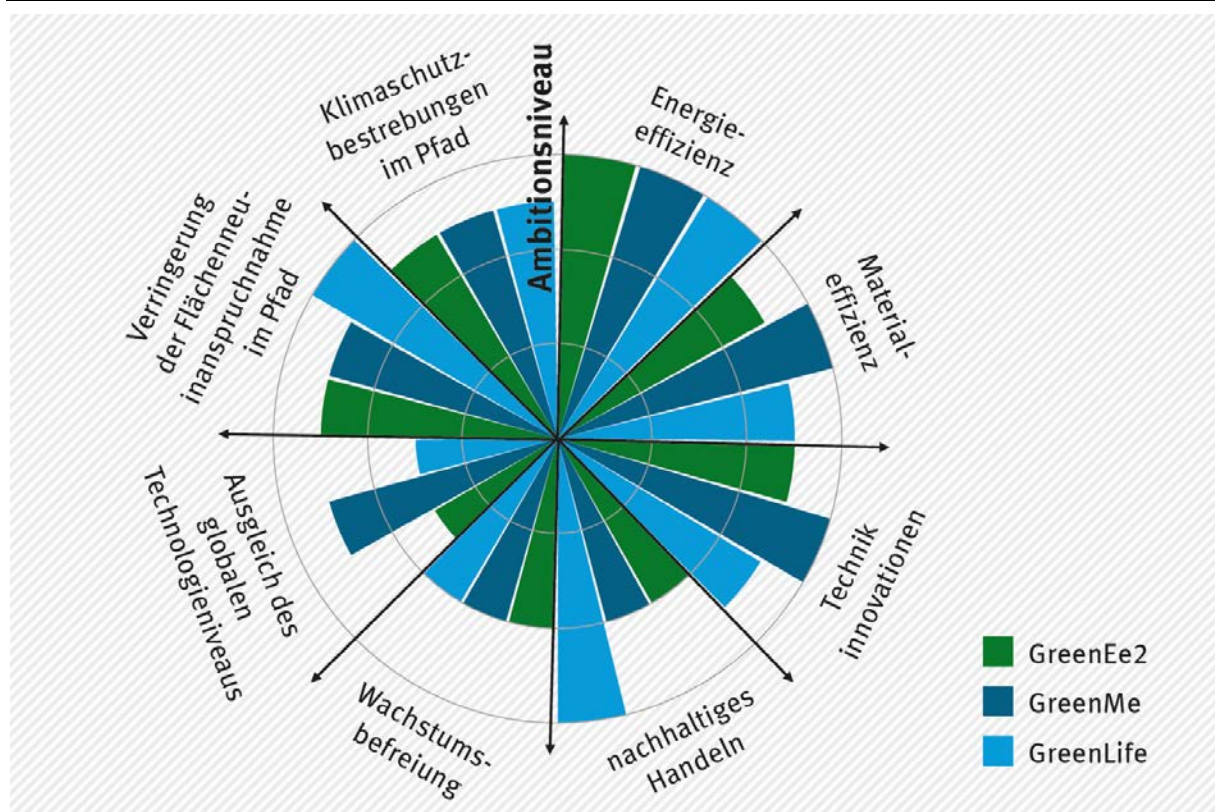


Quelle: eigene Darstellung



Bei einer ausgeglicheneren Handelsbilanz zeigt der Vergleich von GreenEe2, GreenMe und GreenLife, welchen Einfluss technische Klimaschutzmaßnahmen und Änderungen der Lebensweise auf den möglichen Transformationspfad haben. So wird im GreenMe-Szenario davon ausgegangen, dass das Technikniveau der Welt sich durch Wissenstransfer schnell entwickelt und im Jahr 2050 dem Stand in Deutschland und Europa entspricht. Während in den anderen Szenarien davon ausgegangen wird, dass das Technikniveau sich global zwar deutlich angleicht, allerdings dennoch im Jahr 2050 etwa 10 Jahre Unterschied zwischen Entwicklungs- und heutigen Industrieländern bestehen. Die charakteristischen Unterschiede der drei Szenarien sind in Abbildung 3-7 qualitativ dargestellt.

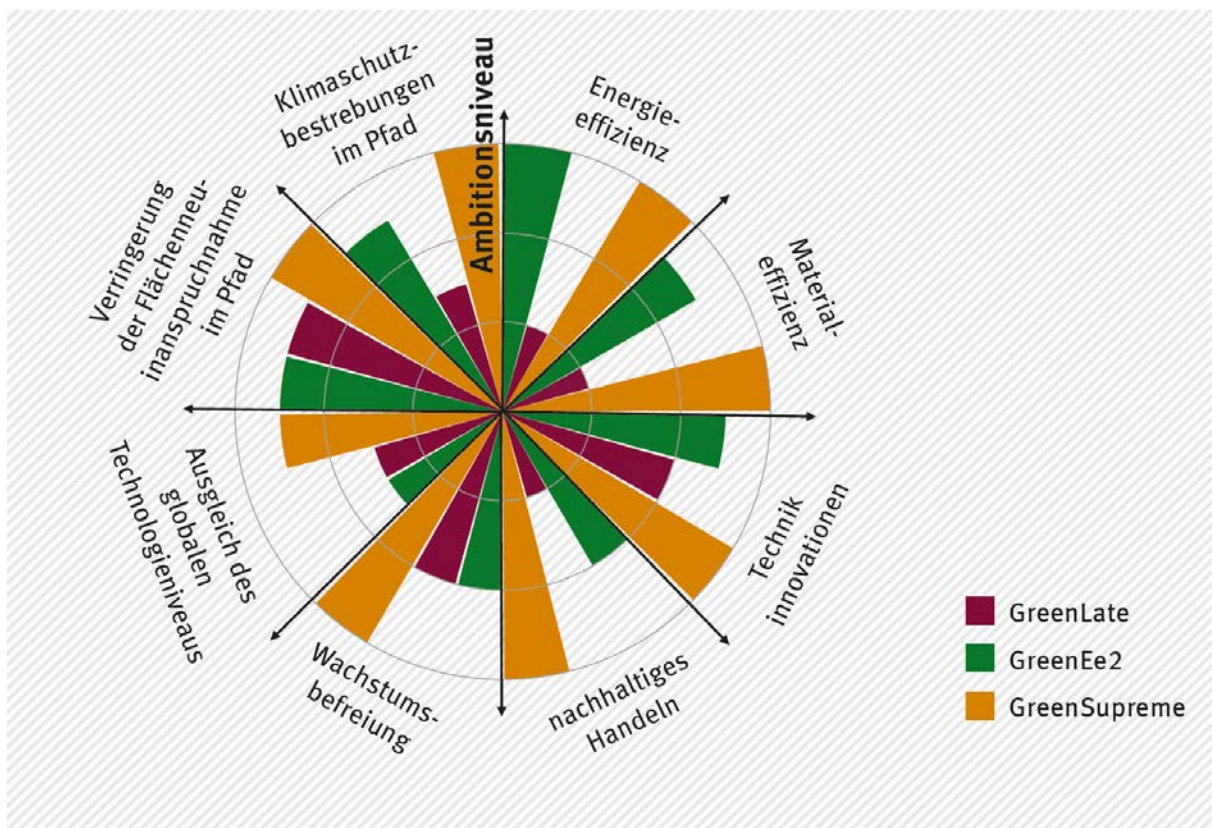
**Abbildung 3-7: Vergleich der charakteristischen Einflussfaktoren für GreenEe2, GreenMe und GreenLife**



Quelle: eigene Darstellung

Das GreenSupreme-Szenario vereinigt all die vorteilhaften Innovationen, technischen Maßnahmen sowie Lebensweisen. Zusätzlich erfolgt die Integration und Umsetzung dieser deutlich schneller als in den vorherigen Szenarien, um so die kumulierten Emissionen zu reduzieren und einen für den internationalen Klimaschutz wichtigen Beitrag auf dem Weg zum Ziel des Pariser-Übereinkommen (UNFCCC, 2015) zu erreichen. Einhergehend ist damit im Unterschied zu allen anderen Szenarien eine stärkere Wachstumsbefreiung der Gesamtwirtschaft. Zum Überblick ist GreenSupreme mit den charakteristischen Eigenschaften in nachfolgender Abbildung 3-8 vergleichend zu GreenEe2 und GreenLate dargestellt.

**Abbildung 3-8: Vergleich der charakteristischen Einflussfaktoren für GreenEe2, GreenLate und GreenSupreme**



Quelle: eigene Darstellung



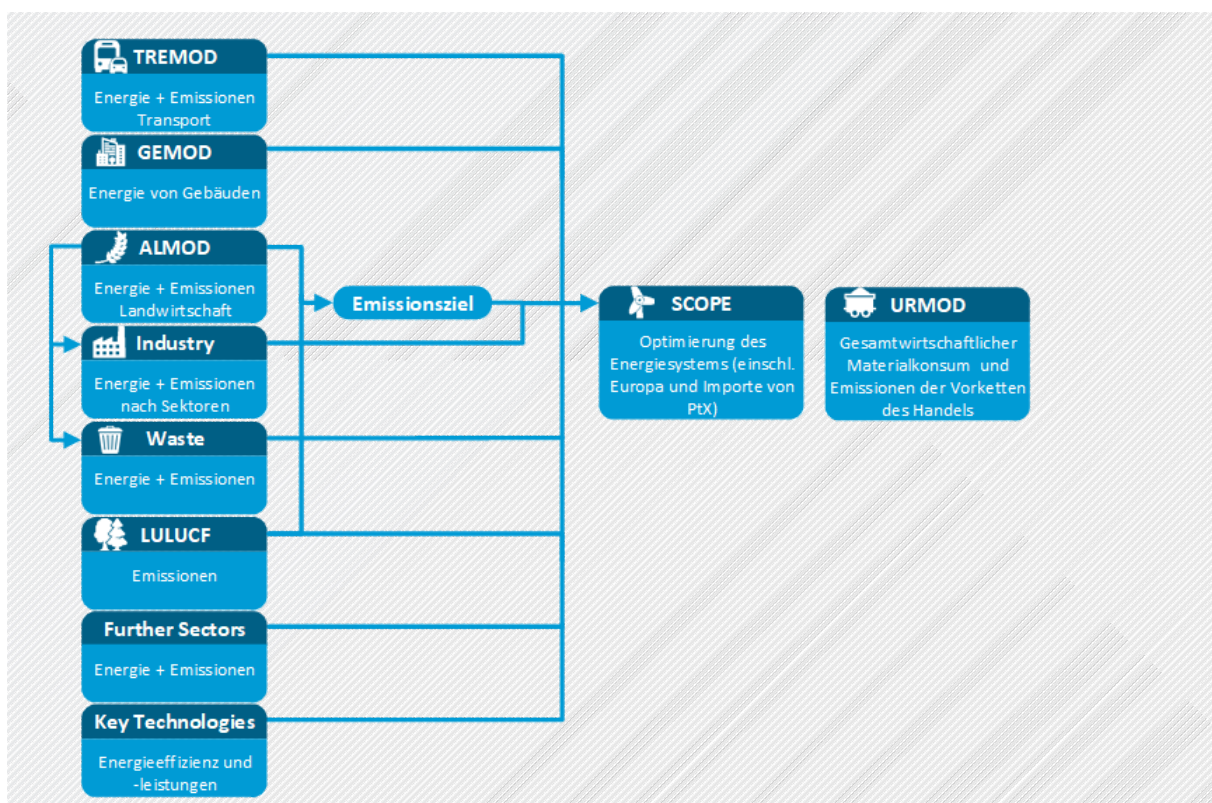
## 4 Methodik

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse basieren im Wesentlichen auf den Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“ (Forschungskennzahl 3715411150). Dabei wurde ein Modellverbund aus insgesamt fünf Modellen genutzt, welche mit sektor- und branchenspezifischen Detailanalysen ergänzt wurden. Die Modellierung im Verkehrsbereich basieren auf TREMOD (Transport Emission Model), im Bereich Raumwärme und Kältebedarfe auf GEMOD (Gebäude-Modell) und im Bereich Landwirtschaft auf ALMOD (Agriculture and LULUCF Model). In Kombination mit den industriellen branchenspezifischen Analysen sowie dem Abfallbereich wurde die Energiemodellierung mit SCOPE (Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems) durchgeführt. Die gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung sowie die vorgelagerten Emissionen wurden mit dem umweltökonomischen Rohstoff- und THG-Modell (URMOD) modelliert. Eine genaue Beschreibung zur Funktionsweise der Modelle ist in (Dittrich et al., 2020a) zu finden.

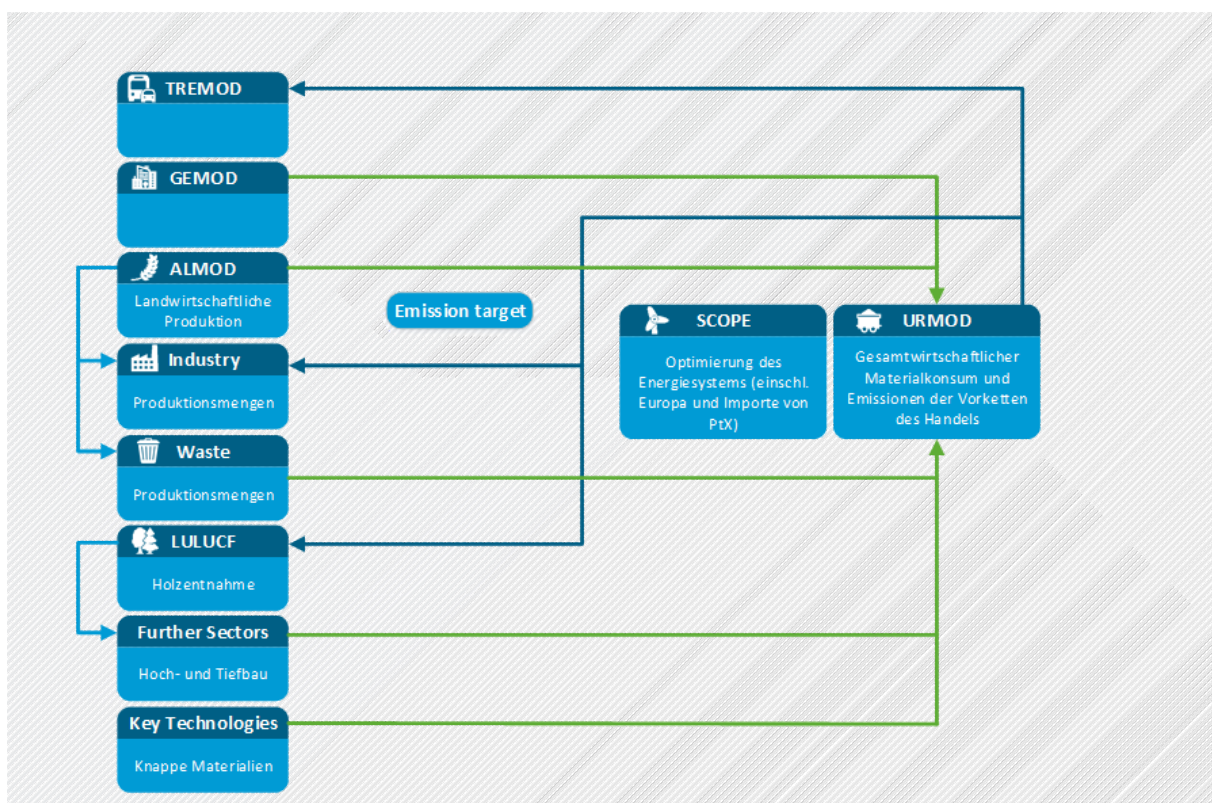
Es sei darauf hingewiesen, dass ausschließlich eine kostenoptimierte Modellierung der Energiewirtschaft erfolgt. Die Annahmen hierzu sind in (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) zu finden. Eine Kostenoptimierung unter Berücksichtigung der volkswirtschaftlichen Kosten, Umwelt- und Gesundheitskosten über alle Emissions- und Rohstoffanspruchsbereiche im Laufe der Transformation erfolgt nicht.

Vor dem Hintergrund der Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der verschiedenen Bereiche erfolgt ein iteratives Vorgehen im Zusammenspiel der Modelle und Detailanalysen.

Im ersten Schritt (siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2) wird mit Hilfe exogener Annahmen die Berechnung im Bereich Industrie, Abfall, Abwasser, Landwirtschaft, LULUCF, Verkehr sowie Raumwärme und Kälte in den jeweiligen Modellen durchgeführt. Für die Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme erfolgt mit Hilfe von URMOD eine Vorabschätzung zur Produktionsentwicklung aufgrund der veränderten Annahmen zur Handelsbilanz sowie in GreenSupreme zum Wirtschaftswachstum (siehe Kapitel 3.1). In GreenEe1 und GreenLate entfällt diese Vorberechnung, da hier die gesamtwirtschaftlichen Entwicklungen exogen vorgegeben sind. Bereits im ersten Schritt werden relevante Wechselwirkungen unter den einzelnen Bereichen berücksichtigt, wie beispielsweise Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie. Im Ergebnis liegen die Treibhausgasemissionen in den Bereichen Abfall, Abwasser, Landwirtschaft, LULUCF sowie für die rohstofflich- bzw. prozessbedingten Emissionen der Industrie vor. Die Szenarien stellen Zielszenarien dar, so dass durch die nicht-energiebedingten Emissionen und der exogen vorgegebenen Treibhausgasminderung im jeweiligen Stützjahr das Treibhausgasbudget für energiebedingte Anwendungen ermittelt und für die energiewirtschaftliche Optimierung in SCOPE bereitgestellt werden kann. Die Endenergiebedarfe der jeweiligen Endenergeträger liegen für alle Anwendungsbereiche vor. Wobei jedoch vor dem Hintergrund der Flexibilisierung und energiewirtschaftlichen Optimierung mittels SCOPE im Bereich Elektromobilität und strombasierter Raumwärmeversorgung Spannweiten im ersten Modellierungsschritt vorgegeben werden.

**Abbildung 4-1: 1. Arbeitsschritt bei der Modellierung**

Quelle: (Dittrich et al., 2020a)

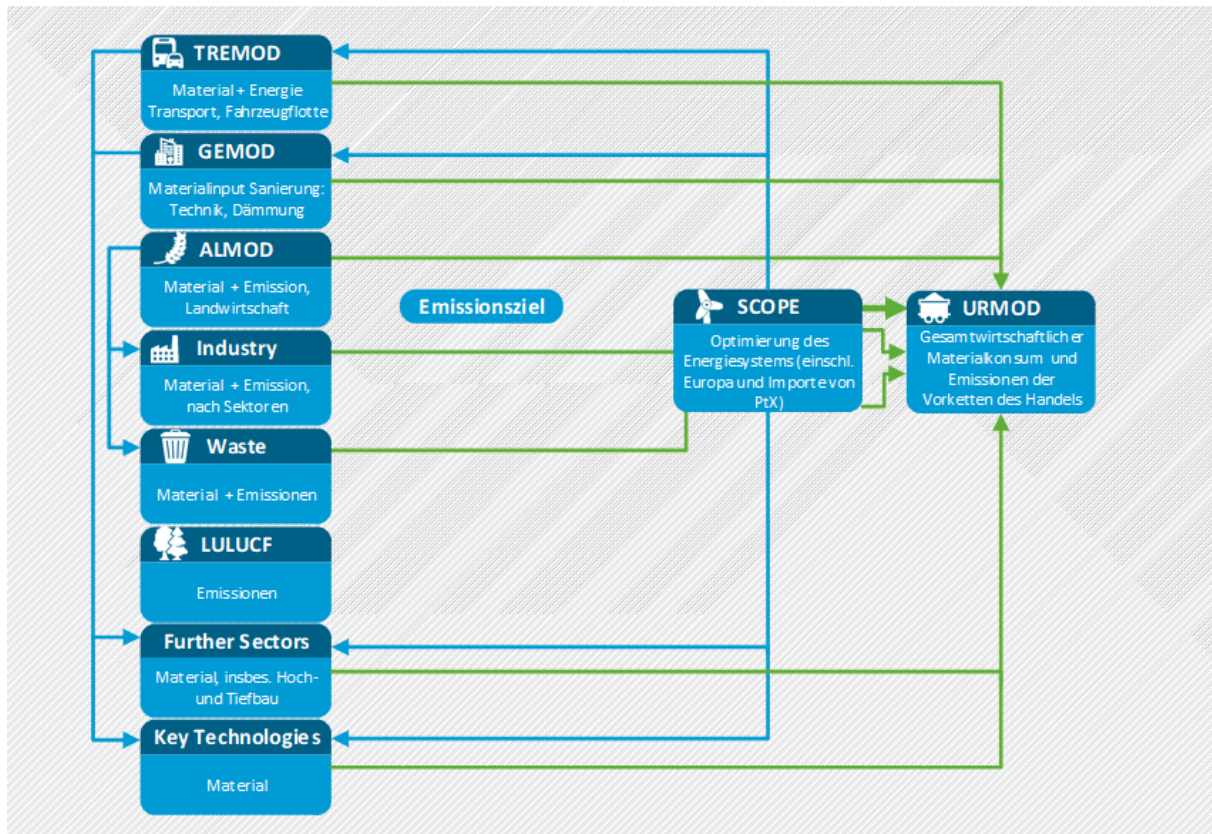
**Abbildung 4-2: ergänzender 1. Arbeitsschritt bei der Modellierung von GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme**

Quelle: (Dittrich et al., 2020a)



Im zweiten Schritt (siehe Abbildung 4-3) erfolgt die energiewirtschaftliche kostenoptimierte Modellierung mit SCOPE. Im Zwischenergebnis stehen die installierten Kapazitäten und Stromerzeugungsmengen inklusive der importierten Mengen und beispielhaften ausländischen Erzeugungskapazitäten bereit. Die energiewirtschaftlichen Ergebnisse und deren Wirkung auf Infrastrukturen, Hochbau sowie den Rohstoffbedarf fließen in URMOD zur gesamtwirtschaftlichen Betrachtung der Materialnutzung ein. In einer Rückkopplung zu TREMOD und GEMOD erfolgt die Synchronisierung bezüglich Elektromobilität und Power to Heat.

**Abbildung 4-3: 2. Arbeitsschritt bei der Modellierung**



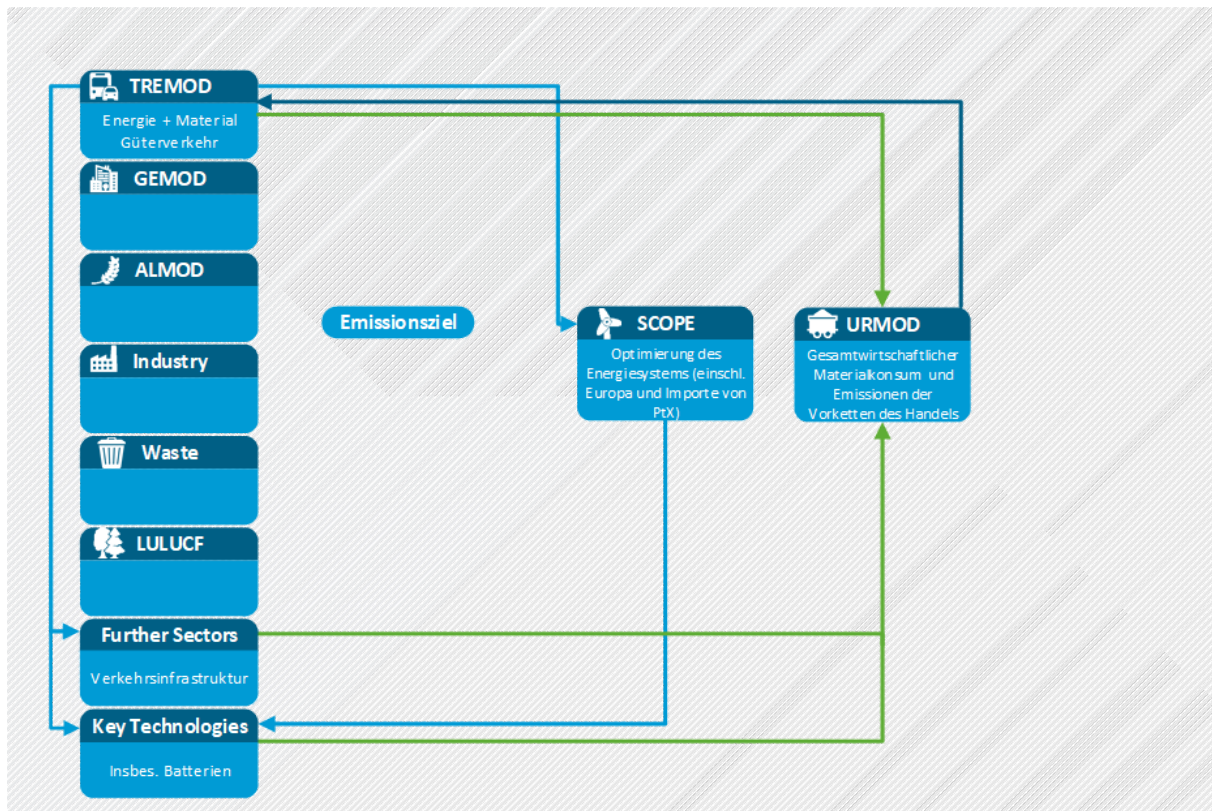
Quelle: (Dittrich et al., 2020a)

Im dritten Schritt (siehe Abbildung 4-4) werden mit URMOD die konkret zu transportierenden Gütermengen ermittelt und so die Iterationsschleife im Bereich Verkehr geschlossen. Damit wird im Modellverbund erstmalig die Güterverkehrsleistung harmonisiert zu Produktion und Konsum ermittelt. Diese neuen Inputdaten werden erneut in SCOPE zur kostenoptimierten energiewirtschaftlichen Modellierung übergeben. Erst jetzt werden die finalen Ergebnisse für die installierten Kapazitäten und Stromerzeugungsmengen inklusive der importierten Mengen und beispielhaften ausländischen Erzeugungskapazitäten bereitgestellt. Durch Rückkopplung mit TREMOD und GEMOD erfolgt die Bereitstellung der konkreten Werte für den Gebäude- und Verkehrsbereich. Abschließend erfolgt die Aktualisierung der gesamtwirtschaftlichen und rohstofflichen Rechnung mit URMOD.

Die Modellierungen werden ausgehend vom Zieljahr 2050 und dann für die Stützjahre 2030 und 2040 durchgeführt, um den Transformationspfad abzubilden. Für jedes Stützjahr erfolgt die obenstehende Schrittfolge. Im Ergebnis liegen sämtliche Energiebedarfe der verschiedenen Anwendungsbereiche und deren Versorgung, Produktionsmengen und dazu konsistente Güterverkehrsmengen, Verkehrsleistungen, Treibhausgasemissionen (mit und ohne Vorketten)

sowie Rohstoffbedarfe für 2030, 2040 und 2050 sowie die kumulierten Treibhausgasemissionen und Rohstoffbedarfe vor.

**Abbildung 4-4: 3. Arbeitsschritt bei der Modellierung**



Quelle: (Dittrich et al., 2020a)

Die modellgestützten Berechnungen werden ergänzt um Berechnung zur Bearbeitung spezifischer Fragestellungen wie etwa der Rohstoffbedarfe für den Transformationspfad relevanter Schlüsseltechnologien oder aber Fragen der Flächennutzung.

## 5 Handlungsfelder

### 5.1 Einleitung

Der Klimawandel und seine Folgen sowie die Ressourcenschonung zählen zu den größten globalen Herausforderungen unserer Zeit. Wie bereits einleitend in Kapitel 1 und 2 aufgezeigt wurde, bedingen beide einander und müssen systemisch gemeinsam gedacht werden.

In allen Bereichen der Gesellschaft müssen Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz geleistet und im Transformationspfad beim Voranschreiten ganzheitlich betrachtet werden. Dies wird in Abbildung 5-1 qualitativ veranschaulicht. Über verschiedene Faktoren, Wechselwirkungen und das alltägliche Handeln jedes Einzelnen sind alle Bereiche, also Angebot und Bereitstellung von Energie und Rohstoffen mit der Nachfrage durch Produktionsbereiche, Infrastrukturen sowie den individuellen Konsum, miteinander verknüpft. Und damit auch deren Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Gesellschaft.

Über Bedürfnisse und Konsumverhalten in Freizeit, Wohnen, Kommunikation, Mobilität und Ernährung (blaue Sechsecke) generiert jeder Einzelne entsprechende Bedarfe, welche wiederum auf die Entwicklung der verschiedenen Produktions- und Dienstleistungsbereiche wirken. Die Bereitstellung dieser Produkte und Dienstleistungen führt zu Ressourceninanspruchnahmen (Rohstoffe, Wasser, Fläche, etc.), Umweltwirkungen (z. B. Treibhausgasemissionen) und sozialen Wirkungen (z. B. Korruption, gewalttätige Konflikte). Beispielsweise kann mit einer gesünderen Ernährung der Bevölkerung die Nachfrage nach Fleischprodukten gesenkt und in Folge dessen die Tierbestandszahlen und damit verbundene Inputs z. B. von Wasser und Phosphor aus Düngemitteln reduziert werden. Dies ist neben anderen technischen und land- und forstwirtschaftlichen Maßnahmen in Betrieben Bestandteil der erforderlichen Agrarwende. Gleichwohl werden über nachhaltige Angebote die Bedürfnisse unseres Alltages verändert. So können als Bestandteil der Verkehrswende beispielsweise eine Stärkung der öffentlichen Verkehrsmittel, Verknüpfung von Infrastruktur insbesondere in Städten, Möglichkeiten der Telearbeit etc. die Bedürfnisse der Bevölkerung befriedigen und zu einer nachhaltigen Mobilität beitragen.

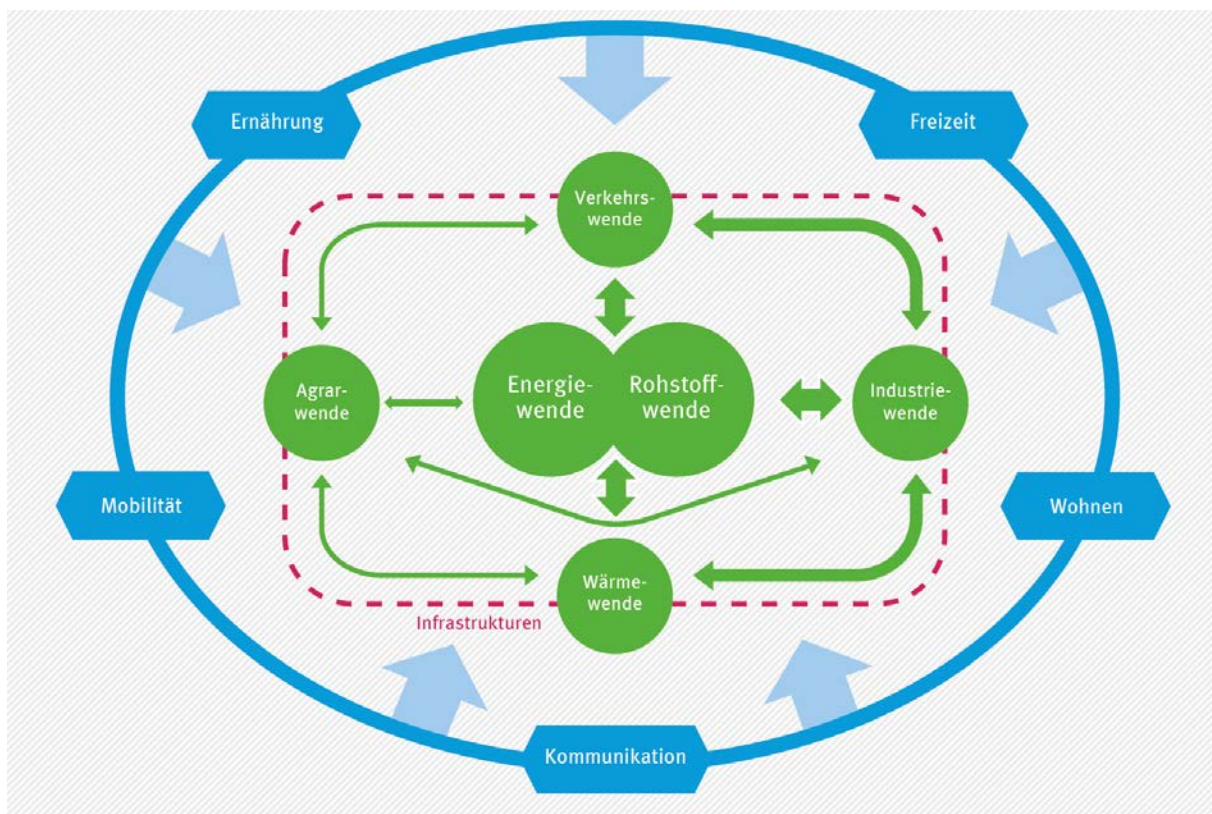
Neben diesen Wechselwirkungen von Angebot und Nachfrage sind über die technischen Umstrukturierungen die verschiedenen Bereiche einer Gesellschaft miteinander verknüpft. In besonderer Weise ist die Umstrukturierung der Energieversorgung (Energiewende) und das Umdenken bei der Primärrohstoffinanspruchnahme hin zu einem geringeren „Rohstoffabdruck Deutschlands“ (Rohstoffwende) (grüne Kreise im Zentrum der Abbildung 5-1) mit den Anpassungen der Anwendungsbereiche und umgekehrt verknüpft (grüne Rechtecke). Der Verzicht auf fossile Energien ist sowohl aus Klima- wie aus Ressourcenschutzperspektive in allen Bereichen unabdingbar. Neben den Investitionszyklen und Erneuerungsraten der konkreten Techniken in den einzelnen Anwendungen ist vor allem die Klimaschutzwirkung im Transformationspfad relevant. Hierfür ist zum einen ein Voranschreiten der Energiewende und zum anderen eine klimafreundliche Integration neuer (Strom-)Verbraucher im Rahmen der Verkehrs-, Wärme- und Industriewende erforderlich (UBA, 2016e). Beispielsweise erreichen bereits heute Techniken wie Power to Heat (PtH) in Verbindung mit Wärmepumpen und Elektromobilität CO<sub>2</sub>-Einsparungen. Hingegen können bei der frühzeitigen Integration von PtG/PtL sogar um ein Mehrfaches an CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgestoßen werden im Vergleich zur direkten Nutzung der fossilen Energieträger, siehe auch Kapitel 5.2.1 und (UBA, 2016g). Damit wird deutlich, dass Energie-, Wärme-, Verkehrs- und Industriewende gemeinsam gedacht werden müssen.



Gleichwohl die Wechselwirkungen bei der Transformation hin zu einer treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Gesellschaft unterschiedlich ausgeprägt sind, wie in Abbildung 5-1 an den unterschiedlichen Pfeilstärken zu erkennen ist: So ist beispielsweise die Verkehrswende, wie gerade erläutert, eng mit der Energiewende verknüpft, aber nur im geringen Maße mit der Agrarwende (über die für den landwirtschaftlichen Betrieb erforderlichen Kraftstoffe und zum Transport landwirtschaftlicher Produkte).

Gleichzeitig ist eine Rohstoffwende erforderlich und unmittelbar bei der Umstrukturierung der Energieversorgung und der Rohstofffinanzierung der erneuerbaren Energietechniken zu beachten (Wiesen et al., 2017). Dabei steht der Begriff „Rohstoffwende“ für eine effiziente und langfristige Nutzung von Rohstoffen in Wirtschaftskreisläufen mit möglichst geringen Umweltwirkungen und unter Berücksichtigung von sozialen Auswirkungen entlang der Lieferkette. Aber auch in den Bedürfnissen der Bevölkerung in Freizeit, Wohnen, Kommunikation, Mobilität und Ernährung muss die Rohstoffwende sich widerspiegeln. Neben der Integration der Elektromobilität unter Berücksichtigung von möglichen Ressourcenaspekten, der energetischen Sanierung, der Umstrukturierung der industriellen Prozesstechniken betrifft dies auch den Aufbau digitaler Infrastrukturen und Kommunikationstechnologien im Alltag. Nicht nur die verfügbaren Gesamtmengen an den konkreten Rohstoffen, sondern ebenfalls die zeitlichen Verläufe der Rohstoffentnahme, die maximal benötigten Bergbaukapazitäten, Produktionskapazitäten und mögliche Recyclingketten und damit verbundene mögliche Knappheiten und Umweltwirkungen sind neben Entwicklungs- und Ausbaugeschwindigkeiten und Investitionszyklen zu bedenken.

Insgesamt muss die Transformation in allen Bereichen unter Aspekten des Klima- und Ressourcenschutzes Hand in Hand gehen. Dabei ist die richtige Balance zwischen Klimaschutz und Ressourcenschonung hinsichtlich der Ausbaugeschwindigkeit zu finden, um eventuell Rohstoffbedarfsspitzen und kumulierte Treibhausgasemissionen zu minimieren und gleichzeitig die richtigen Anreize zu setzen, um die langfristige Wirkung von Maßnahmen und Einsatzbereitschaft von Techniken sowie die dafür erforderlichen Infrastrukturen zu gewährleisten.

**Abbildung 5-1: Schematische Darstellung des gemeinschaftlichen Transformationspfades der Emissionsquellgruppen**

Quelle: eigene Darstellung

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Umstrukturierung der einzelnen Bereiche detailliert betrachtet. Dabei sind in den Green-Szenarien die Wechselwirkungen der Sektoren untereinander sowie die Wechselwirkungen der erforderliche Energie- und Rohstoffwende weitestgehend bedacht.

## 5.2 Energieversorgung

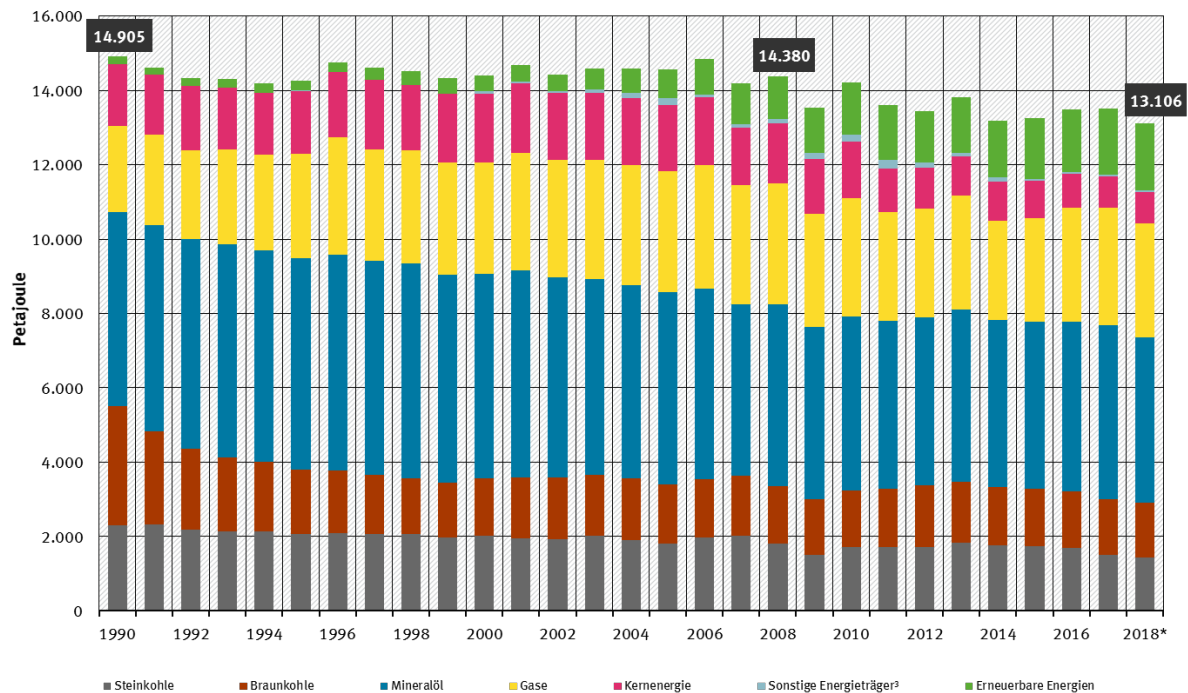
Deutschlands Energieversorgung basiert derzeit auf der Nutzung fossiler Rohstoffe. Die energiebedingten Emissionen verursachten 2018 etwa 84 % der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland. Die Energieversorgung und deren Umstrukturierung nimmt daher eine zentrale Rolle bei der Begrenzung des Klimawandels und dem Erreichen der Klimaschutzziele ein.

In 2018 basierten rund 79 % des Primärenergieverbrauchs Deutschlands auf fossilen und noch 6 % auf nuklearen Energieträgern, wie in Abbildung 5-2 (UBA auf Basis AG Energiebilanzen, 2019) erkenntlich ist. Rund 70 % des Primärenergiebedarfes wurden durch Importe vornehmlich fossiler Energieträger gedeckt. Die Energieversorgung Deutschlands ist damit stark in die globalen Energiemärkte eingebettet. In den vergangenen Jahren wurden schon große Veränderungen erreicht. Durch Effizienzsteigerungen konnte Deutschland den absoluten Bedarf an Primärenergie gegenüber 2008 bereits um rund 9 % reduzieren. Ziel der Bundesregierung ist eine Halbierung bis zum Jahr 2050 (BMWi, 2010).

Der Anteil der fossilen und nuklearen Energieträger an der Bruttostromerzeugung lag im Jahr 2018 noch bei knapp 50 % im Gegensatz zu 84 % 1990. Im Jahr 2011 hat Deutschland den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen, sodass bis 2022 dieser Anteil auf null sinkt. Der

Anteil erneuerbarer Energien betrug 2018 35 %. Bis zum Jahr 2030 soll der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch 65 % erreichen (Bundesregierung, 2018b).

**Abbildung 5-2: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern**



Quelle: (UBA auf Basis AG Energiebilanzen, 2019)

Mit der Energiewende erfolgt die Transformation weg von fossilen, ressourcenintensiven Energieträgern hin zu einer umweltschonenden, treibhausgasneutralen Energieversorgung. Dabei ist eine sichere Energieversorgung als zentrales Fundament unseres heutigen Wohlstands- und Wirtschaftsniveaus zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund der nach heutigem Kenntnisstand begrenzten Emissionsminderungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft und Industrie ist eine vollständige Vermeidung von Treibhausgasemissionen in der Energieversorgung erforderlich. Dies kann gelingen, wenn

- ▶ Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale über alle Bereiche hinweg erschlossen werden und der Bedarf an Energie reduziert wird,
- ▶ eine vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien erfolgt,
- ▶ eine effiziente Integration von Sektorkopplungstechniken stattfindet und
- ▶ dies durch den Ausbau der Infrastrukturen unterstützt wird.

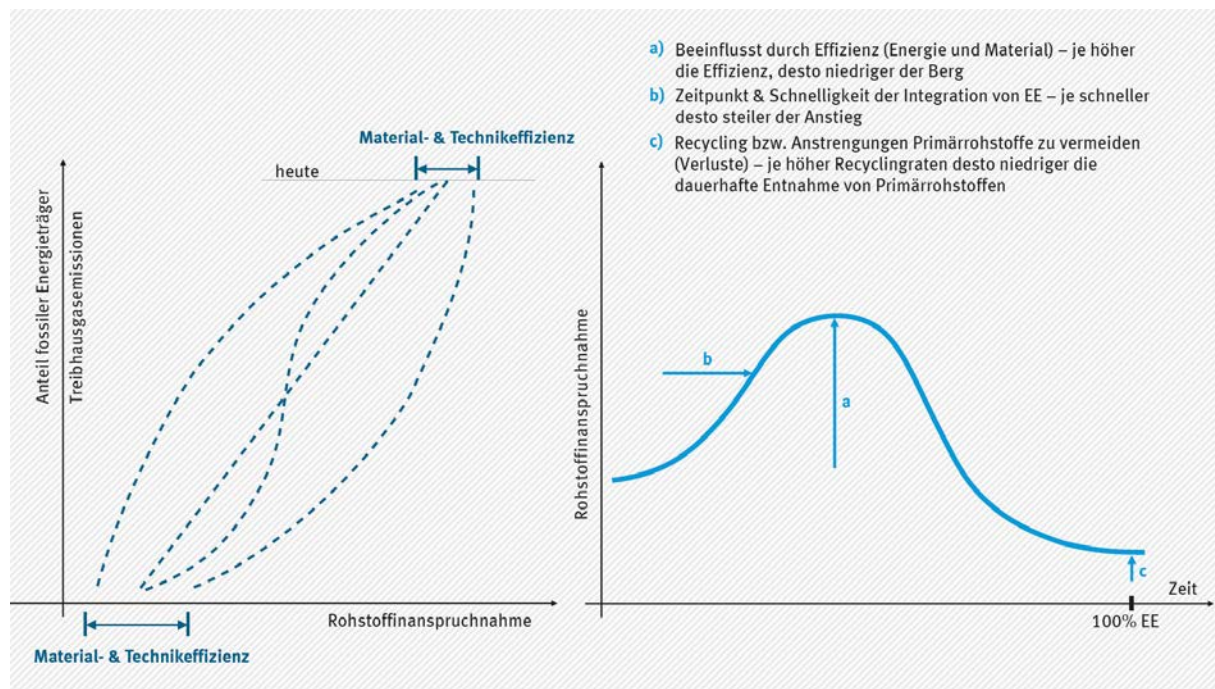
Dass eine solche Energiewende ohne Kohlendioxid-Abtrennung und -speicherung (CCS), energetische Nutzung von Anbaubiomasse und Atomenergie gelingen kann, hat das Umweltbundesamt bereits gezeigt (UBA, 2010, 2014c, 2019e).

Bei der Umstrukturierung der Energieversorgung werden die Wechselwirkungen von Klima- und Ressourcenschutz besonders deutlich. Durch die Substitution der fossilen Energieträger können die mit der Energieversorgung verursachten Treibhausgasemissionen bis auf null reduziert werden, siehe Abbildung 5-3 (links). Dadurch wird gleichfalls der große fossil bedingte Anteil an der Rohstoffinanspruchnahme, heute knapp unter 30 % unseres



Primärrohstoffbedarfs, reduziert. Eine vollständige Reduktion der Primärrohstoffinanspruchnahme ist aufgrund von Wachstumseffekten, funktionalen Verlusten, Downcycling und dissipativen Verwendungen von Materialien technologisch und thermodynamisch nicht gänzlich zu vermeiden (Cullen, 2017; Mayer et al., 2019). Die Menge der verbleibenden erforderlichen Primärrohstoffe wird durch Energieeffizienz und Materialeffizienz während Produktion und Nutzung der eingesetzten Technik sowie der Lebensdauer und Reparierbarkeit und dem Beitrag von Recycling bestimmt. Gleichwohl besteht zum Aufbau des erneuerbaren Energiesystems ein zumindest zeitweise erhöhter Rohstoffbedarf, vor allem an metallischen Rohstoffen. Je schneller die Integration der erneuerbaren Energien erfolgt, desto schneller werden die Rohstoffe benötigt. In der qualitativen Darstellung in Abbildung 5-3 (rechts) bedeutet ein schnellerer Ausbau einen steileren Anstieg bei der Rohstoffinanspruchnahme und somit in der Darstellung eine Stauchung der dargestellten Kurve. Über die Energieeffizienz, den Energiebedarf der Anwendungsbereiche und die Materialeffizienz und Technikwahl kann die Höhe (Kurvenmaximum) der erforderlichen Rohstoffinanspruchnahme beeinflusst werden. Letztlich wird auch in einem vollständigen erneuerbaren Energiesystem eine Primärrohstoffinanspruchnahme erforderlich sein, da vollständiges Recycling nur schwer umsetzbar und technisch kaum möglich ist sowie dissipative Verluste nicht vermeidbar sind. Durch die Recyclinganstrengungen wird jedoch die Höhe der Primärrohstoffinanspruchnahme und somit die Höhe der auslaufenden Kurve in Abbildung 5-3 (rechts) beeinflusst.

**Abbildung 5-3: Qualitative Darstellung der Änderungen der Treibhausgasemissionen und Rohstoffinanspruchnahme aus der Energieversorgung (links) sowie qualitative Darstellung der Rohstoffinanspruchnahme in Abhängigkeit der Umstrukturierung des Energiesystems auf erneuerbare Energien (rechts)**



Quelle: eigene Darstellung

Aus Abbildung 5-3 (links) wird deutlich, dass bei der Umstellung auf ein vollständig erneuerbares Energiesystem unterschiedliche Wege möglich sind und bezüglich der Rohstoffinanspruchnahme unterschiedliche Endpunkte, siehe auch Kapitel 4 und (UBA, 2019e). Die Gestaltung der Green-Szenarien soll diesen Einflussparametern gerecht werden und damit

den Lösungsraum und die Konsequenzen aus unterschiedlichen Pfaden zur Transformation des Energiesystems aufzeigen, siehe Tabelle 5-1.

**Tabelle 5-1: Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Energie**

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Ausstieg aus der Kohleverstromung	vor 2040				bis 2030
Ausstieg aus der Brennstoffnutzung von Kohle	bis 2050				bis 2040
Ausbau der erneuerbaren Energien	schnell				sehr schnell
Heben der Energieeffizienzpotentiale	sehr hoch	mittel	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Vermeidung von Energiebedarfen durch bewusste Verhaltensweise	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	sehr hoch
Endenergiebedarfe über alle Anwendungsbereiche	Niedrig	hoch	niedrig	sehr niedrig	sehr niedrig
Materialeffizienz der eingesetzten Techniken	hoch	mittel	sehr hoch	hoch	sehr hoch

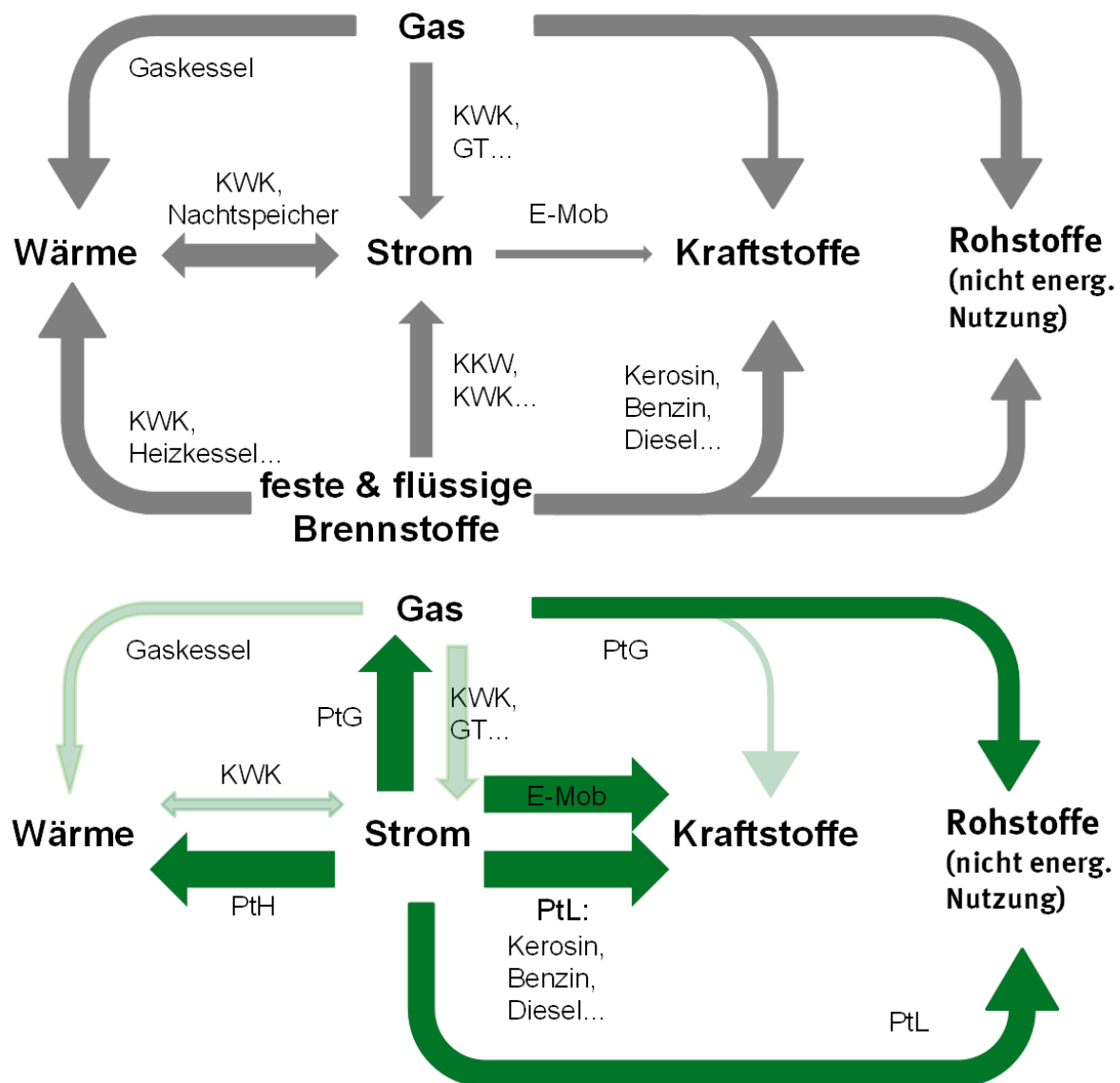
### 5.2.1 Sektorkopplung

Sektorkopplung, also die Verknüpfung von Strom mit den Anwendungsbereichen<sup>22</sup>, ist an sich nichts Neues. Diese bestehen bereits seit Jahrzehnten, beispielsweise in der Mobilität beim Schienenverkehr, beim Kochen oder beim Betrieb von KWK-Anlagen. Im Zuge der Energiewende und der Klimaschutzanstrengungen ist auch eine Transformation der Sektorkopplung erforderlich, siehe Abbildung 5-4. Sektorkopplung ermöglicht mit Hilfe der Power to X-Techniken (PtX) durch direkte oder indirekte Verwendung von erneuerbarem Strom eine treibhausgasneutrale Versorgung aller Anwendungsbereiche bzw. die vollständige Substitution fossiler Energieträger und Rohstoffe. Das bedeutet, dass zunehmend PtX-Techniken integriert werden. Dies spiegelt sich ebenso in den Bedarfsentwicklungen (Kapitel 0) für alle Szenarien wider, in denen eine Zunahme der direkten Stromanwendungen im Laufe des Transformationspfades erkennbar ist.

<sup>22</sup> Also: Raumwärme, Prozesswärme, mechanische Energie etc..



**Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der klassischen (oben) und zukünftigen (unten) Sektorkopplung**



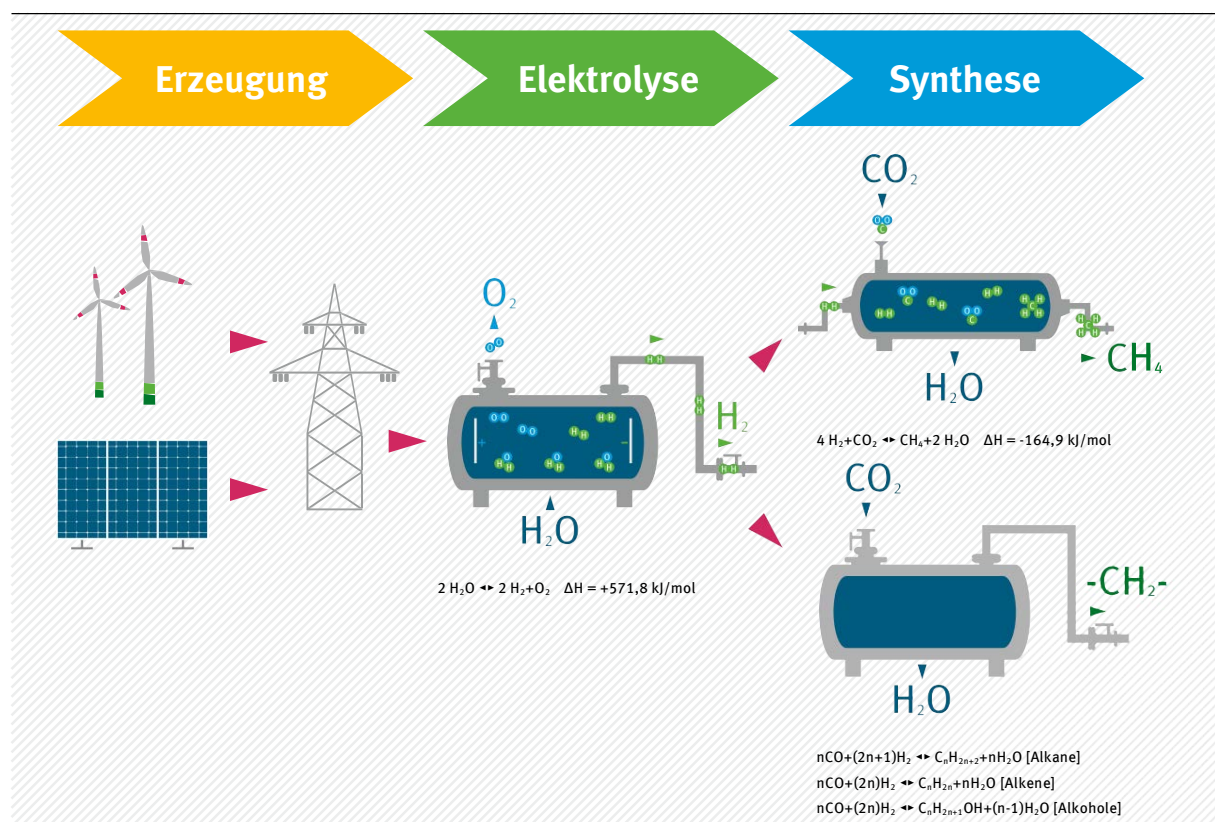
Quelle: (Purr, 2016)

Im Vergleich zu heute (Abbildung 5-4, oben) wird zunehmend durch die Sektorkopplungstechniken der erneuerbare Strom das Fundament der Energieversorgung darstellen. Wie in Abbildung 5-4, unten zu sehen ist, kann ausgehend vom erneuerbaren Strom eine treibhausgasneutrale Energieversorgung ermöglicht werden. Darüber hinaus unterstützen sie die Integration der erneuerbaren Energien und die Flexibilisierung im Zuge einer zunehmenden fluktuierenden Erzeugung. Zur Wärmeversorgung, also sowohl Raum- als auch Prozesswärme, werden vermehrt Power to Heat – Techniken (bspw. Elektrokessel, Elektroschmelzen, Wärmepumpen) zum Einsatz kommen. Die PtH-Techniken in der Industrie sind sehr unterschiedlich und im hohen Maße vom eigentlichen Produktionsprozess abhängig und bedürfen noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, wohingegen PtH-Techniken zur Raumwärmeversorgung am Markt verfügbar sind. Die Elektromobilität bildet die effizienteste Nutzung von erneuerbarem Strom und damit die effizienteste Art der Sektorkopplung zwischen Strom und Mobilität. Gleichwohl sind nicht alle verkehrlichen Anwendungen elektrifizierbar, beispielsweise im Luftverkehr. Hier werden nach heutigem Kenntnisstand auch langfristig flüssige Energieträger benötigt. Auch in einigen Prozesstechniken

in der Industrie werden nach heutigem Kenntnisstand, wie in Tabelle 5-3 erkenntlich ist, weiterhin kohlenstoffhaltige Brennstoffe zur Bereitstellung der Wärme benötigt. Auch zur Versorgung der nicht-energetischen Bedarfe, bspw. in der chemischen Industrie, sind zukünftig kohlenstoffhaltige Energieträger erforderlich. Über Power to Gas und Power to Liquid als Sektorkopplungstechniken können diese durch indirekte Verwendung von erneuerbarem Strom bereitgestellt werden. Wasserstoff und erneuerbares Methan werden mit Power to Gas (PtG) und flüssige Kohlenwasserstoffe mit Power to Liquid (PtL)-Techniken bereitgestellt. Im ersten Schritt erfolgt dabei immer die Wasserelektrolyse, in der Wasser mithilfe von Strom in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Dieser Wasserstoff kann direkt oder als Speichermedium für energetische und stoffliche Anwendungen genutzt werden. In den Szenarien erfolgt insbesondere eine direkte Nutzung bei der Transformation der fossilen Wasserstoffwirtschaft in der chemischen Industrie und eine neue Integration bei der Transformation der Stahlindustrie zum Betrieb der DRI-Anlagen, siehe Kapitel 5.5. In katalytischen oder biogenen Synthesen können in Verbindung mit Kohlenstoff Methan oder verschiedene langkettige Kohlenwasserstoffe produziert werden. Ein Überblick dazu wird in Abbildung 5-5 gegeben.

Die Sektorkopplung rückt den erneuerbaren Strom ins Zentrum der Energieversorgung, so dass ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien nicht nur für die Dekarbonisierung der Stromversorgung, sondern für das gesamte Gelingen der Energiewende fundamental ist. Denn nur die Nutzung von erneuerbar erzeugtem Strom kann eine Dekarbonisierung durch Sektorkopplung gewährleisten.

**Abbildung 5-5: Schematische Funktionsweise von PtG und PtL**



Quelle: (UBA, 2016e)

### 5.2.1.1 Herausforderungen bei der Integration von Sektorkopplungstechniken

Neben den gerade dargestellten technischen Möglichkeiten und Langfristperspektiven sind auch bei der Integration der neuen Stromverbraucher verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, bspw. die Substitutionswirkungen der PtX-Techniken, Investitionszyklen, Anforderungen an die Flexibilität der PtX-Techniken, langfristige Gewährleistung der treibhausgasextensiven Techniken u.v.m.. Letztlich stellt sich für ein Gelingen der Energiewende nicht die Frage, ob Sektorkopplung Bestandteil dieser Transformation ist, sondern ausschließlich die Frage, wie Sektorkopplung sinnvoll ausgestaltet werden soll. Nachfolgend soll auf ausgewählte Aspekte zur Integration von Sektorkopplungstechniken näher eingegangen werden.

#### 5.2.1.1.1 Klimaschutzwirkungen

Wie in Kapitel 5.2.1 dargestellt, bieten die PtX-Techniken die Möglichkeit, sämtliche fossilen Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffbedarfe auf Basis erneuerbarer Energien zu substituieren. Im Transformationspfad bis zu einer vollständigen erneuerbaren Stromversorgung ist die Klimaschutzwirkung differenzierter zu betrachten. Die Klimaschutzwirkung der PtX-Techniken wird durch:

- ▶ den zu substituierenden Energieträger,
- ▶ die Treibhausgasemissionen des eingesetzten Stromes und
- ▶ bei PtG-Methan und PtL zusätzlich durch die verwendete Kohlenstoffquelle bestimmt.

Für die Substitution fossiler Energieträger in den Anwendungsbereichen bestehen meist mehrere Möglichkeiten an PtX-Techniken. In Abhängigkeit der jeweiligen Effizienzen weisen die PtX-Techniken stark unterschiedliche Substitutionspotentiale auf. Beispielsweise können mit 1 kWh Strom in Verbindung mit Wärmepumpen mehr als 3 kWh Erdgas in der Raumwärmeversorgung substituiert werden. Wird der Strom dagegen zuerst mittels PtG zur Methanherzeugung verwendet und dann zur Raumwärmeversorgung klassisch in konventionellen Techniken wie Brennwertkesseln eingesetzt, können nur rund 0,6 kWh Erdgas ersetzt werden. Dementsprechend können bei der Substitution von Erdgas durch 1 kWh erneuerbaren Stroms beim Einsatz einer Wärmepumpe rund 640 g CO<sub>2</sub>Äq und beim Einsatz der gleichen Strommenge in Verbindung mit PtG und einem Brennwertkessel nur rund 120 g CO<sub>2</sub>Äq eingespart werden. Ein Überblick über die Substitutionswirkung einiger PtX-Techniken wird in Abbildung 5-6 gegeben.

**Abbildung 5-6: Substitutionswirkung von PtX-Techniken**

Nutzung regenerativer Strom			Substitution fossiler Bereitstellung				
regenerative Bereitstellung			fossile Einsparung			Substitutions- verhältnis Energie	Vermiedene THG- Emisisonen in CO <sub>2</sub> Äq
Input	Technik	bereitgestellte Energie / Nutzen	Technik	Input			
1 kWh reg. Strom	PtH Wärmepumpe	3,3 kWh Wärme	3,3 kWh Wärme	Brennwertkessel (105%)	3,14 kWh Erdgas	3,14	~ 640
1 kWh reg. Strom	E-Auto (80%)	4,6 km	4,6 km	Verbrennungs- motor (28%)	2,6 kWh fl. Kraftstoff	2,6	~ 690
1 kWh reg. Strom	PtH direktelektrisch	0,95 kWh Wärme	0,95 kWh Wärme	Brennwertkessel (105%)	0,91 kWh Erdgas	0,91	~ 185
1 kWh reg. Strom	PtG – H <sub>2</sub> stofflich	0,74 kWh Wasserstoff	0,74 kWh Wasserstoff	Dampfreforming (85,2%)	0,87 kWh Erdgas	0,87	~ 180
1 kWh reg. Strom	PtG – CH <sub>4</sub>	0,58 kWh Methan	0,58 kWh Methan		0,58 kWh Erdgas	0,58	~ 120
1 kWh reg. Strom	PtL	0,5 kWh fl. Kraftstoff	0,5 kWh fl. Kraftstoff		0,5 kWh fl. Kraftstoff	0,5	~ 135

Hinweis: Das tatsächliche Substitutionsverhältnis und vermiedenen THG-Emissionen sind abhängig von den tatsächlichen Wirkungsgraden der Anlagen- und Anwendungstechniken und können damit zu den hier pauschalisierten Annahmen abweichen.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (UBA, 2016e)

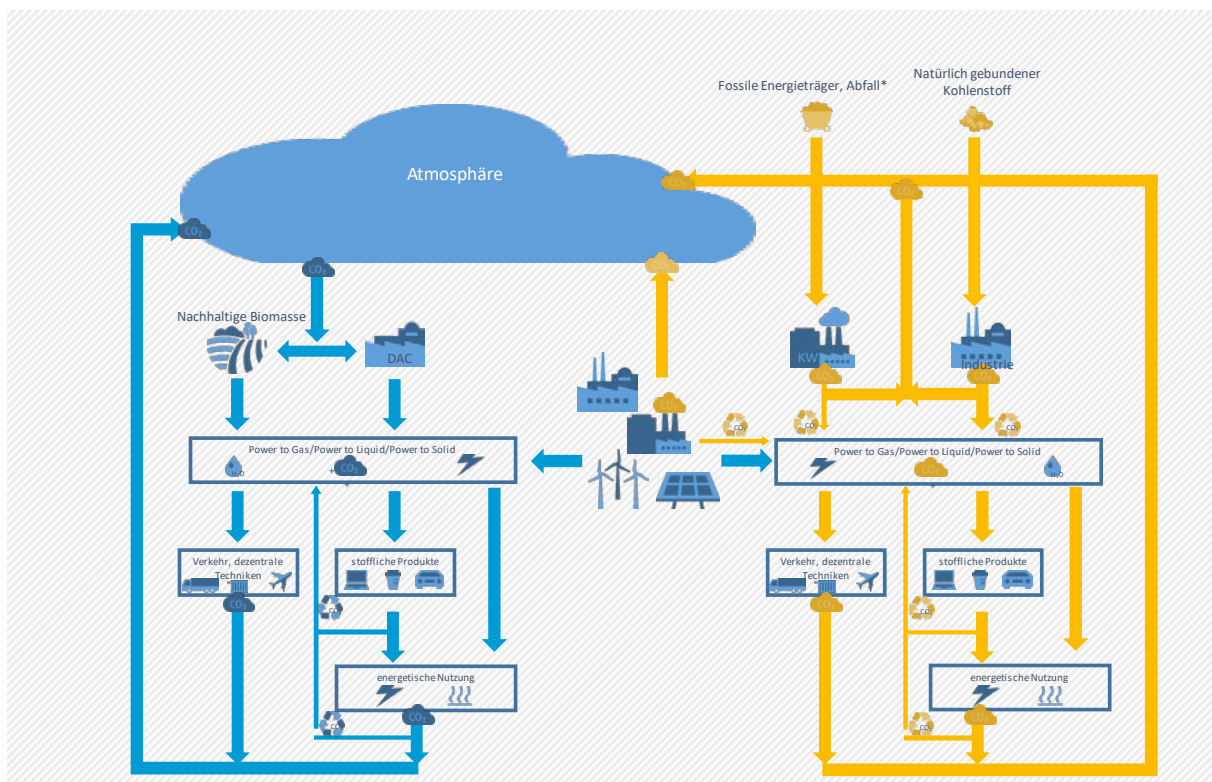
In Abbildung 5-6 wurde vereinfachend dargestellt, dass es sich um vollständigen erneuerbaren Strom handelt. Ist dies nicht der Fall, verringert sich die Substitutionswirkung. Die tatsächlich verursachten Treibhausgasemissionen der PtX-Techniken sind im hohen Maße vom Zeitpunkt der Stromnutzung abhängig. Damit ist nicht nur der Zeithorizont im Transformationsprozess gemeint, sondern auch der unmittelbare Nutzungszeitpunkt. So wird beim Ersetzen des Dampfreforming durch strombasierte Elektrolyse erst ab einem CO<sub>2</sub>-Gehalt im Bezugsstrom etwa 180 g CO<sub>2</sub>Äq/kWh oder bei der Substitution fossilen Erdgases durch PtG-Methan erst ab etwa 120 g CO<sub>2</sub>Äq/kWh (BMU, 2016b) überhaupt eine Treibhausgasminderungswirkung erreicht. Hingegen ergibt sich für Elektrofahrzeuge schon heute ein Vorteil gegenüber konventionellen Fahrzeugen, solange der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Bezugsstrom unter 690 g CO<sub>2</sub>Äq/kWh liegt, siehe Abbildung 5-6.

Bei einer zu frühen Integration dieser neuen, oft ineffizienteren Stromverbraucher führt dies zu einer höheren Auslastung konventioneller fossiler Stromerzeugung und damit zu THG-Mehremissionen, sodass de facto eine Energiewandlung fossiler Energieträger zu Gas (Coal/Gas-to-Gas) oder flüssigen Kraftstoffen (Coal/Gas to Liquid) erfolgen würde (UBA, 2016e). Vor diesem Hintergrund sind effiziente Techniken mit hohem Substitutionspotential zu bevorzugen und im Laufe des Transformationsprozesses frühzeitiger in die Stromversorgung zu integrieren (UBA, 2016e).

Neben der Klimawirkung des Strombezuges und der vermiedenen THG-Emissionen ist bei PtG/PtL-Anlagen, welche kohlenstoffhaltige Produkte bereitstellen, gleichfalls die Kohlenstoffquelle bei der Klimaschutzwirkung mit zu berücksichtigen. Während die THG-Emissionsbelastung des Strombezuges im Transformationspfad sich verändert und immer geringer wird, ist die Treibhausgaswirkung der verwendeten Kohlenstoffquelle bei der Bereitstellung von strombasierten kohlenstoffhaltigen Brenn-, Kraft- und Rohstoffen

gleichbleibend. Prinzipiell stehen atmosphärischer Kohlenstoff, der ggf. bereits biogen gebunden wurde sowie fossiler (darunter auch Kohlenstoff aus prozessbedingten Emissionen der Industrie) zur Verfügung. Ausschließlich durch die Verwendung von atmosphärischem Kohlenstoff werden dauerhaft keine Mehremissionen verursacht. Vielmehr ist langfristig, vor dem Hintergrund der vielen Verbraucher im Verkehr eine Kreislaufführung des Rohstoffs Kohlenstoff nur über die Atmosphäre möglich (UBA, 2014c). In Abbildung 5-7 ist dies auf der linken Seite erkennbar. Fossiler Kohlenstoff, der in industriellen Produktionsprozessen freigesetzt wird (Brandkalk, Zement) und technisch nicht vermeidbar ist, führt unabhängig von der Anzahl der Mehrfachnutzung (CCU – Carbon Capture and Utilization) immer zu einer Erhöhung der vom Menschen verursachten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre, wie rechts in Abbildung 5-7 veranschaulicht wird<sup>23</sup>.

**Abbildung 5-7: Schematische Darstellung Kohlenstoffnutzung in PtG/PtL-Anlagen**



Hinweis: \*Der Energieträger Müll basiert in Abhängigkeit der Umstellung der chemischen Industrie zunehmend auf erneuerbaren strombasierten Kohlenstoffprodukten, so dass er sich als Energieträger von der derzeit rechten Seite auf die linke Seite der qualitativen Darstellung verschiebt und sich dort konkret im qualitativen Recycling-Prozessen wiederfindet.  
Quelle: eigene Darstellung

#### 5.2.1.1.2 Vermeidungskosten

Einen weiteren Aspekt - insbesondere im Transformationspfad - stellen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten dar, welche mit dem Einsatz von erneuerbarem Strom verbunden sind. Denn in Abhängigkeit des Substitutionsverhältnisses und der CO<sub>2</sub>-Belastung des zu substituierenden fossilen Energieträgers ergeben sich unterschiedliche Kosten. In Abbildung 5-8 ist vergleichend dargestellt, wenn zum einen erneuerbarer Strom direkt zur Substitution verwendet wird und zum anderen die identische Substitution über den PtG/PtL-Pfad erfolgt. Die

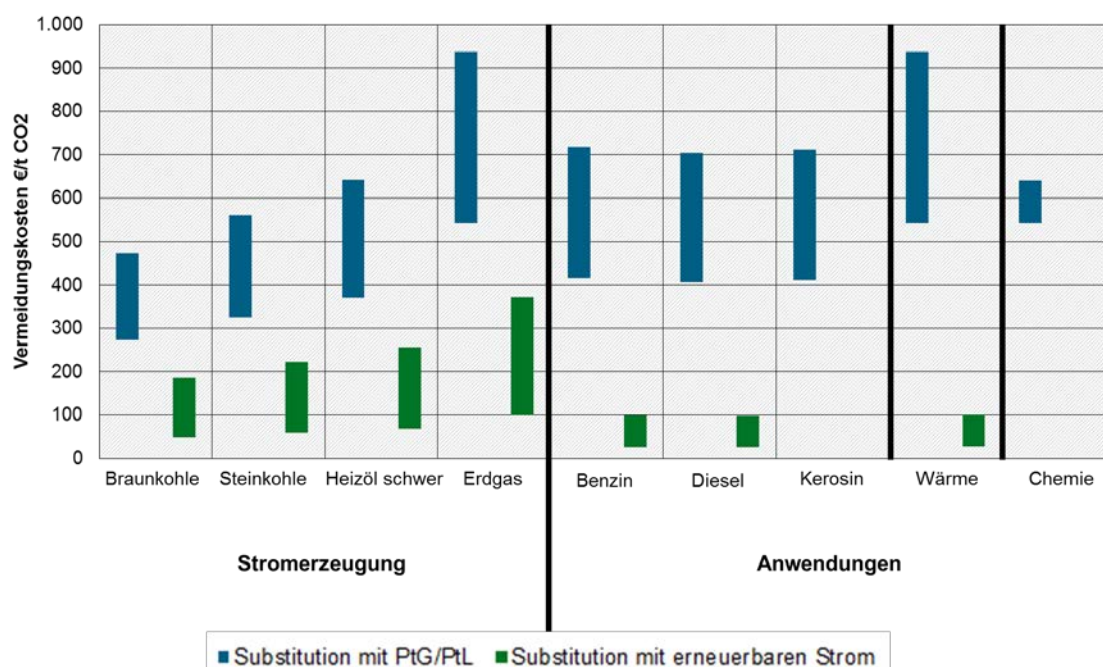
<sup>23</sup> Der Energieträger Müll basiert in Abhängigkeit der Umstellung der chemischen Industrie zunehmend auf erneuerbaren strombasierten Kohlenstoffprodukten, so dass er sich als Energieträger von der derzeit rechten Seite der Grafik auf die linke Seite der qualitativen Darstellung verschiebt. Und dort konkret im qualitativen Recycling-Prozessen wiederfindet.



fossilen Brennstoffkosten und deren Entwicklung werden nicht bei diesem Vergleich berücksichtigt, da ein Vergleich der treibhausgasneutralen strombasierten Alternativen zu fossilen Energieträgern erfolgt. Es ist zu erkennen, dass in der Stromversorgung immer die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom die kostengünstigere Klimaschutzmaßnahme ist und der Einsatz von PtG-Rückverstromung auf das Mindestmaß zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit reduziert werden sollte. In den Anwendungsbereichen wird deutlich, dass im Verkehr, wo mittels Elektromobilität Benzin und Diesel substituiert werden können, oder im Bereich Wärme, wo Wärmepumpen zum Einsatz kommen können, vor dem Hintergrund deutlich höherer Wirkungsgrade dieser PtX-Techniken, die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bezogen auf die reinen Energiekosten am niedrigsten sind. Die eins-zu-eins-Substitution, also Erdgas durch PtG-Methan oder Benzin durch PtL-Benzin, ist um ein vielfaches teurer, um die gleichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmeversorgung oder im Verkehr zu vermeiden. Der direkte Stromeinsatz ist im Verkehr um etwa das Siebenfache und der Wärme etwas das Neunfache günstiger im Vergleich zum Einsatz von PtG oder PtL. In Bereichen, in denen keine direkte Stromnutzung möglich ist, müssen die hohen Vermeidungskosten in Kauf genommen werden. Dies ist etwa in den Bereichen Luftverkehr oder chemischen Industrie der Fall.

Die erneuerbaren Brennstoffkosten und die erneuerbaren Stromgestehungskosten, die in Abbildung 5-8 ausschließlich betrachtet werden, sind jedoch nur ein Teil der anfallenden Kosten. Oft sind die neuen effizienten Techniken in den Investitionskosten deutlich teurer als die konventionellen Techniken, was sich deutlich in der Einzelwirtschaftlichkeit niederschlägt. Darüber hinaus wirken staatlich bestimmte Preisbestandteile, die in Deutschland momentan noch effiziente PtX-Techniken benachteiligen. Hier sind unterstützend die Rahmenbedingungen anzupassen, um volkswirtschaftlich effiziente Anreize zu setzen.

**Abbildung 5-8: Spannweiten für CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für den Einsatz von erneuerbarem Strom – Differenzbetrachtung in Bezug auf fossile Energieträger**



Hinweis: Es handelt sich um Brutto-Vermeidungskosten. Die Differenzkosten zu den fossilen Energieträgern wurden nicht dargestellt. Es handelt sich ausschließlich um einen Vergleich strombasierter treibhausgasneutraler Substitutionsoptionen.

Quelle: eigene Darstellung<sup>24</sup>

### 5.2.1.2 Integration der Sektorkopplung in den Green-Szenarien

In den Green-Szenarien erfolgt die Integration der PtX-Technik unterschiedlich, entsprechend der Szenariencharakteristik, siehe Kapitel 3. Insbesondere beim ambitionierten GreenSupreme-Szenario werden überall dort, wo es technisch möglich ist, bis ins Jahr 2050 fossile Energieträger durch direkte Nutzung von erneuerbarem Strom substituiert. Im GreenLate-Szenario hingegen finden Entwicklung und Einführung THG-extensiver Techniken in den Anwendungsbereichen insbesondere der Industrie und des Schwerlastverkehrs verzögert statt, so dass zwar die Weichen richtig gestellt werden, jedoch konventionelle Energietechniken in 2050 noch im Einsatz sind und diese mit erneuerbar erzeugten strombasierten gasförmigen oder flüssigen Energieträgern versorgt werden. Dieses Szenario illustriert dementsprechend auch die Auswirkungen geringerer „Elektrifizierung“ in den Anwendungsbereichen. Dieses prinzipielle Vorgehen bei der Integration der PtX-Techniken erfolgt über alle Anwendungsbereiche hinweg und wird nachfolgend beispielhaft aufgezeigt.

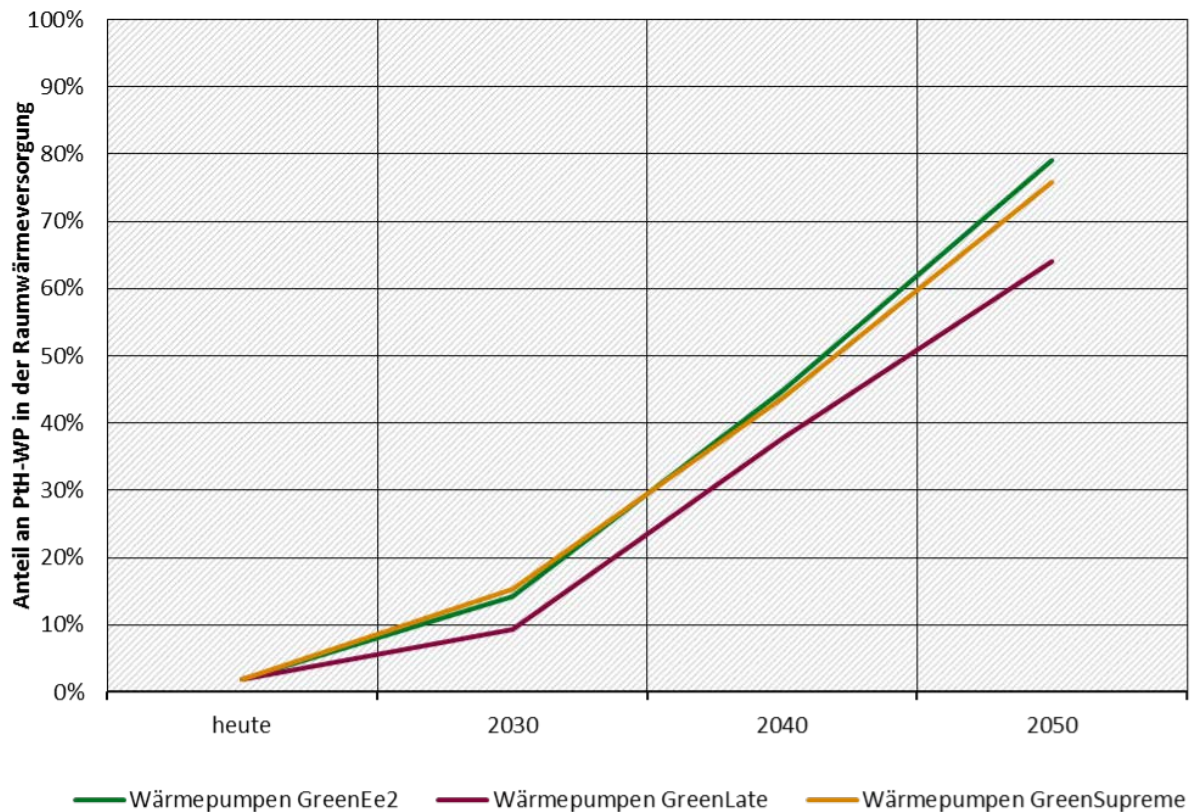
#### 5.2.1.2.1 Power to Heat

Beispielhaft werden die sich aus den Szenariencharakteristiken ergebenden Unterschiede an der Integration dezentraler Wärmepumpen in der Raumwärmeversorgung beschrieben und in Abbildung 5-9 dargestellt. Vor dem Hintergrund der hohen Substitutionswirkung erfolgt in allen Green-Szenarien frühzeitig die Integration. In GreenEe2, hier exemplarisch auch für GreenEe1 und GreenMe, erfolgt nach 2030 die stetige ambitionierte Integration von Power to Heat in Verbindung mit Wärmepumpen. Im Ergebnis werden rund 80 % der Raumwärmeversorgung mittels Power to Heat in Kombination mit Umweltwärme versorgt. Die restlichen 20 % werden mit Fernwärme versorgt. In GreenSupreme, hier exemplarisch auch für GreenLife, werden Wärmepumpen bereits vor 2030 etwas schneller integriert. Vor dem Hintergrund der anteilig höheren leitungsgebundenen Wärmeversorgung liegt der Anteil der Wärmepumpen 2050 unter GreenEe2 (für nähere Ausführungen siehe Kapitel 5.3.4). Im GreenLate Szenario hingegen erfolgt die Integration bereits bis 2030 deutlich langsamer. Auch in den Dekaden danach erfolgt die Integration im Vergleich zu den anderen Szenarien langsamer und endet 2050 auf einem niedrigeren Niveau. Es verbleibt 2050 weiterhin ein Anteil an Gasheizkesseln, welche mit erneuerbaren Gasen befeuert werden.

Diese prinzipiellen Charakteristiken spiegeln sich auch bei der Integration von Power to Heat zur Prozesswärmeversorgung und damit der Umstrukturierung der Prozesstechniken wieder.

---

<sup>24</sup> Die Berechnungen erfolgten auf Basis der Emissionsfaktoren fossiler Energieträger: Steinkohle 338,12 kg CO<sub>2</sub>/MWh, Braunkohle 402,35 kg CO<sub>2</sub>/MWh, Erdgas 202,76 kg CO<sub>2</sub>/MWh, Heizöl schwer 296,27 kg CO<sub>2</sub>/MWh, Benzin 264,50 kg CO<sub>2</sub>/MWh, Diesel 269,74 kg CO<sub>2</sub>/MWh und Kerosin 266,73 kg CO<sub>2</sub>/MWh. Sowie auf Basis von PtG/PtL-Kosten in einem Bereich von 110 bis 190 €/MWh und Stromgestehungskosten von 20 bis 75 €/MWh, welche jeweils den unteren und oberen Bereich darstellen.

**Abbildung 5-9: Integration der PtH-Technik in der Raumwärmeversorgung<sup>25</sup> in ausgewählten Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

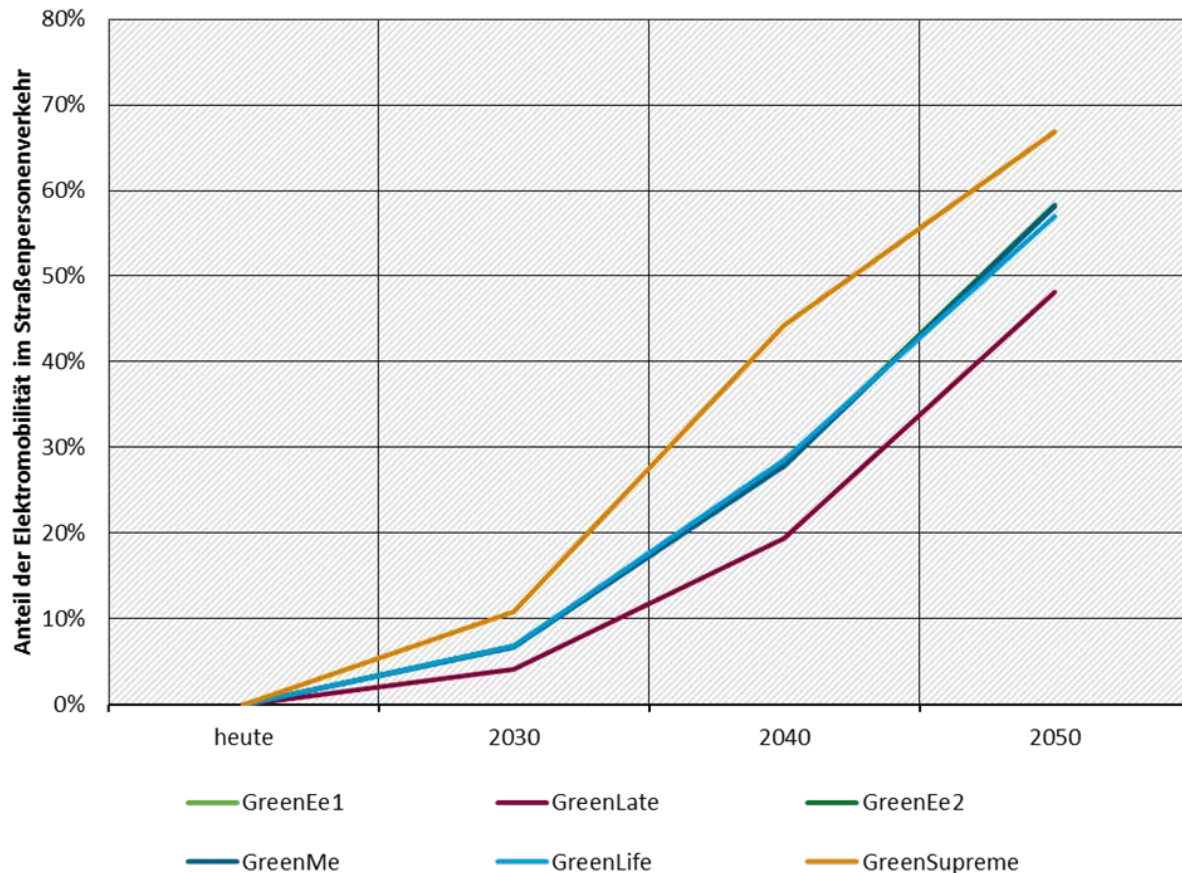
#### 5.2.1.2.2 Elektromobilität

Im Bereich Verkehr werden die sich aus den Szenariencharakteristiken ergebenden Unterschiede anhand der Integration der Elektromobilität dargestellt. Wie in Abbildung 5-6 ersichtlich, ist die Elektromobilität eine Sektorkopplungstechnik, die bereits heute eine Klimaschutzwirkung leisten kann und langfristig die effizienteste Technik im Straßenverkehr darstellt. Dementsprechend erfolgt schnellstmöglich die Integration dieser Technik in allen Green-Szenarien. Dabei erfolgt die Integration in GreenSupreme bereits bis 2030 ambitionierter und steigert sich nochmals in der darauffolgenden Dekade. Bis 2050 wird der höchste Anteil an Elektromobilität im Straßenpersonenverkehr erreicht. In GreenLate hingegen wird die Technik deutlich langsamer integriert, es wird länger an konventionellen Antriebstechniken festgehalten. Erst ab 2045 werden ausschließlich Elektrofahrzeuge neu zugelassen, so dass auch 2050 ein geringerer Anteil auf der direkten Stromnutzung basiert und ein höherer Bedarf an PtL als in den anderen Green-Szenarien besteht. Die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife bewegen sich im Zwischenbereich eng beieinander.

<sup>25</sup> Ohne Anteil der Wärmepumpen in der leitungsgebundenen Raumwärmeversorgung.



**Abbildung 5-10: Integration der Elektromobilität in den Green-Szenarien im Straßenpersonenverkehr\***



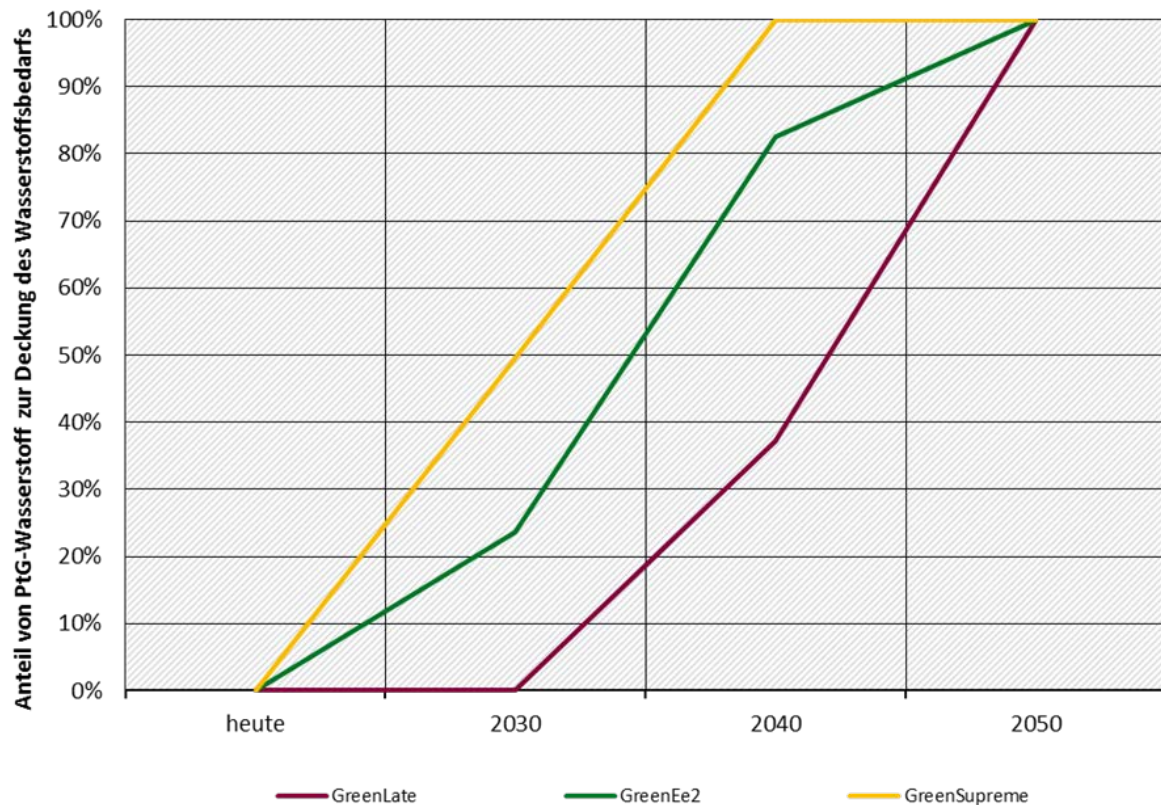
Hinweis: \*Anteil der Elektromobilität als Anteil des Stromes am Endenergieverbrauch.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.1.2.3 Power to Gas - Wasserstoff

Wasserstoff wird in den Green-Szenarien zur Substitution der konventionellen Wasserstoffwirtschaft benötigt. Für die chemische Industrie wird heute der Bedarf an Wasserstoff mittels Dampfreforming aus Erdgas bereitgestellt. Darüber hinaus erfolgt in allen Green-Szenarien die Umstellung der Stahlindustrie auf den Betrieb von DRI-Anlagen, siehe Kapitel 5.5, welche gleichfalls PtG-Wasserstoff-Anlagen in den Produktionsprozess integrieren.

Wie in Kapitel 5.2.1.1.1 beschrieben, wird ab einem Bezugsstrom mit einer Treibhausgasemissionsbelastung von etwa 180 g CO<sub>2</sub>Äq/kWh eine Klimaschutzwirkung erreicht, wenn PtG-Wasserstoff-Anlagen die konventionelle fossil basierte Technik substituieren. Alle Green-Szenarien weisen 2030 eine durchschnittliche Treibhausgasbelastung im Strom unterhalb von 180 g CO<sub>2</sub>Äq/kWh auf. GreenSupreme sogar nur 60 g CO<sub>2</sub>Äq/kWh, siehe auch Abbildung 5-17, so dass hier eine schnelle Integration in Deutschland von PtG-Wasserstoff-Anlagen erfolgt und diese bereits 2040 vollständig den erforderlichen Wasserstoffbedarf im Szenario 2040 decken, siehe Abbildung 5-11. Im Vergleich dazu beginnt in GreenLate erst nach 2030 die Integration von PtG-Wasserstoff-Anlagen. GreenEe2 stellt den typischen Verlauf für die weiteren Green-Szenarien dar.

**Abbildung 5-11: Integration von PtG-Wasserstoff zur Deckung des Wasserstoffbedarfs in ausgewählten Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.1.2.4 Power to Gas – Methan – und Power to Liquid

Wie in Kapitel 0 dargestellt, besteht in allen Szenarien weiterhin ein Bedarf an gasförmigen und flüssigen kohlenstoffhaltigen Energieträgern. Die Integration der Produktionsanlagen in Deutschland ist mit den oben genannten Herausforderungen (siehe Kapitel 5.2.1.1) verbunden. In allen Green-Szenarien, außer GreenSupreme, werden erst in der Dekade nach 2040 Power to Gas – Methan-Anlagen in Deutschland zugebaut, wenn die Anteile der nationalen Stromversorgung über 80 % liegen (siehe Abbildung 5-34). In GreenSupreme wird bereits 2040 ein Anteil erneuerbarer Energien an der nationalen Stromversorgung von über 80 % erreicht, so dass dann schon rund 22 TWh<sup>26</sup> PtG produziert werden.

Der Zubau in Deutschland erfolgt nur in dem Maße, wie am Weltmarkt konkurrenzfähiges PtG oder PtL produziert werden kann. In Szenarien mit geringen Endenergiebedarfen wie in GreenSupreme oder GreenLife stehen neben der Deckung der reinen Strombedarfe in 2050 mehr kostengünstige Standorte von erneuerbaren Energieanlagen in Deutschland zur Verfügung, welche international konkurrenzfähig PtG/PtL-Produkte bereitstellen können. In GreenLife und GreenSupreme sind sogar ausreichend konkurrenzfähige Standorte verfügbar, so dass über den nationalen Gasbedarf hinaus PtG produziert und exportiert werden könnte. Es wurde jedoch im Modell unterstellt, dass kein Export von PtG-Methan erfolgt, sondern über die nationalen Gasbedarfe hinaus ebenso flüssige strombasierte Kohlenwasserstoffe für den Verkehr oder die Industrie produziert werden.<sup>27</sup> In der nachfolgenden Tabelle 5-2 sind PtG/PtL-Produktionsmengen der einzelnen Green-Szenarien in Deutschland dargestellt.

<sup>26</sup> Hierfür werden rund 32 TWh Strom benötigt.

<sup>27</sup> In den Szenarien erfolgt die Zuordnung beispielhaft beim Verkehr.



Wie auch global stellen die nationalen PtG/PtL-Anlagen CCU-Techniken dar. Kohlenstoff wird aus atmosphärischen Quellen inkl. biogenen Quellen (bspw. Brauereien) oder fossilen Kohlenstoffquellen (bspw. industriellen Punktquellen oder nach heutigem Kenntnisstand nicht vermeidbare CO<sub>2</sub>-Emissionen, aus bspw. Zement- und Kalkindustrie) genutzt. Die Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff mit Direct-Air-Capture-Anlagen kommt vor allem international zum Einsatz.

**Tabelle 5-2: PtG-CH<sub>4</sub>/PtL-Produktionsmengen in Deutschland in den Green-Szenarien**

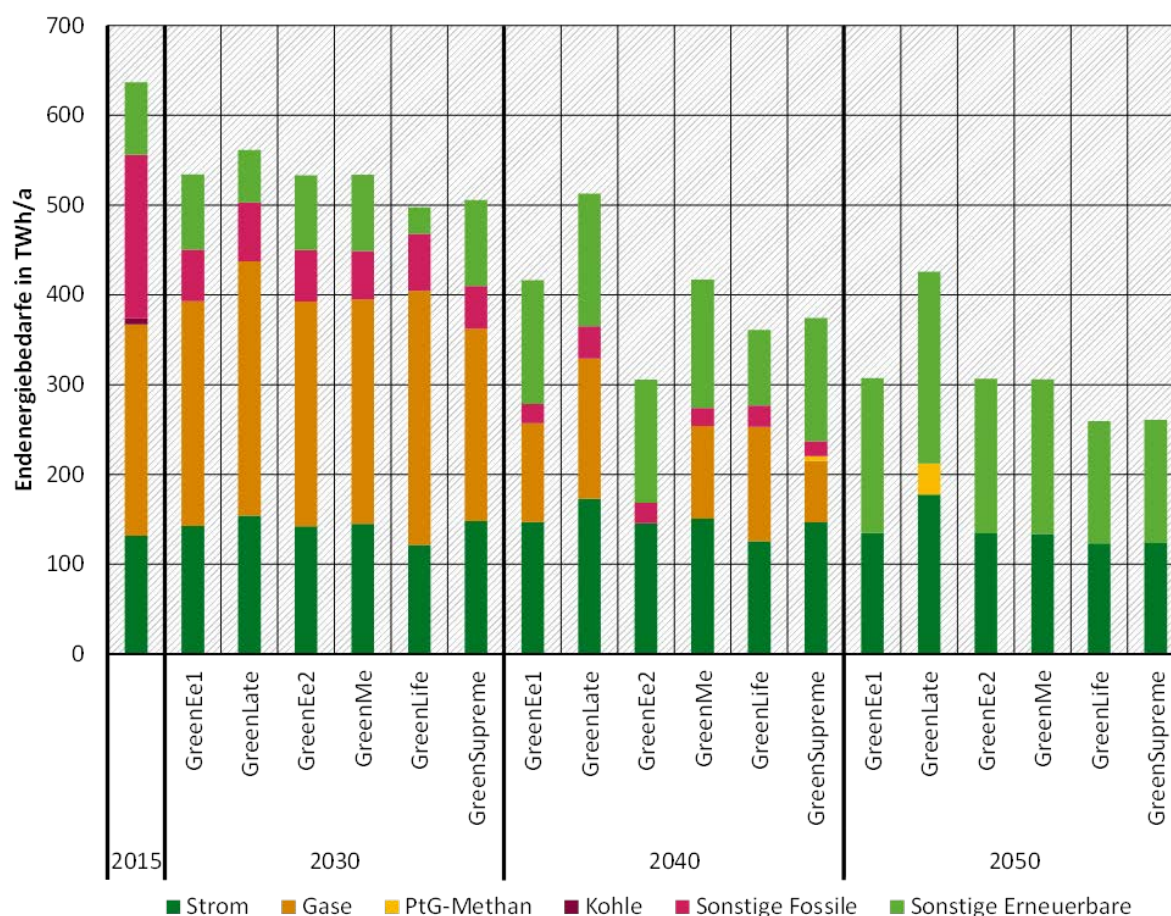
		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
2040	Strombedarf in TWh	-	-	-	-	-	32
	PtG-Produktion in TWh	-	-	-	-	-	22
	PtL-Produktion in TWh	-	-	-	-	-	-
2050	Strombedarf in TWh	90	78,4	123,8	104,8	122,9	120
	PtG-Produktion in TWh	62,9	54,8	86,6	73,3	85,9	83,9
	PtL-Produktion in TWh	-	-	-	-	4,2	16

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

## 5.2.2 Entwicklung der Endenergiebedarfe

### 5.2.2.1 Private Haushalte

In den privaten Haushalten können insbesondere durch Sanierung und Modernisierung Effizienzpotentiale erschlossen und die Bedarfe bis 2050 deutlich reduziert werden, siehe Kapitel 5.3. Die Bereiche Beleuchtung und Prozesswärme in privaten Haushalten können zwar auch Reduktionsbeiträge leisten, diese sind jedoch bei weitem nicht so groß. Bis 2050 wird der Bedarf insgesamt um rund 33 % in GreenLate gegenüber 2015 gesenkt, wie in Abbildung 5-12 zu sehen ist. Durch den veränderten gesellschaftlichen Anspruch im Bereich Wohnen, welcher einhergeht mit einer niedrigeren Wohnfläche pro Person als in GreenEe1 und 2, GreenMe und GreenLate sinken in GreenLife und GreenSupreme die Bedarfe für Raumwärme nochmals deutlich, siehe Kapitel 5.3. So erfolgt in GreenEe1 und GreenEe2 sowie GreenMe eine Minderung um 52 % auf rund knapp 310 TWh und in GreenLife und GreenSupreme werden nur rund 260 TWh (-59 %) in den privaten Haushalten benötigt. Kohle kommt bereits am Ende der 2020er in allen Szenarien in den privaten Haushalten nicht mehr zum Einsatz.

**Abbildung 5-12: Entwicklung der Endenergiebedarfe im Bereich private Haushalte nach Energieträgern in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

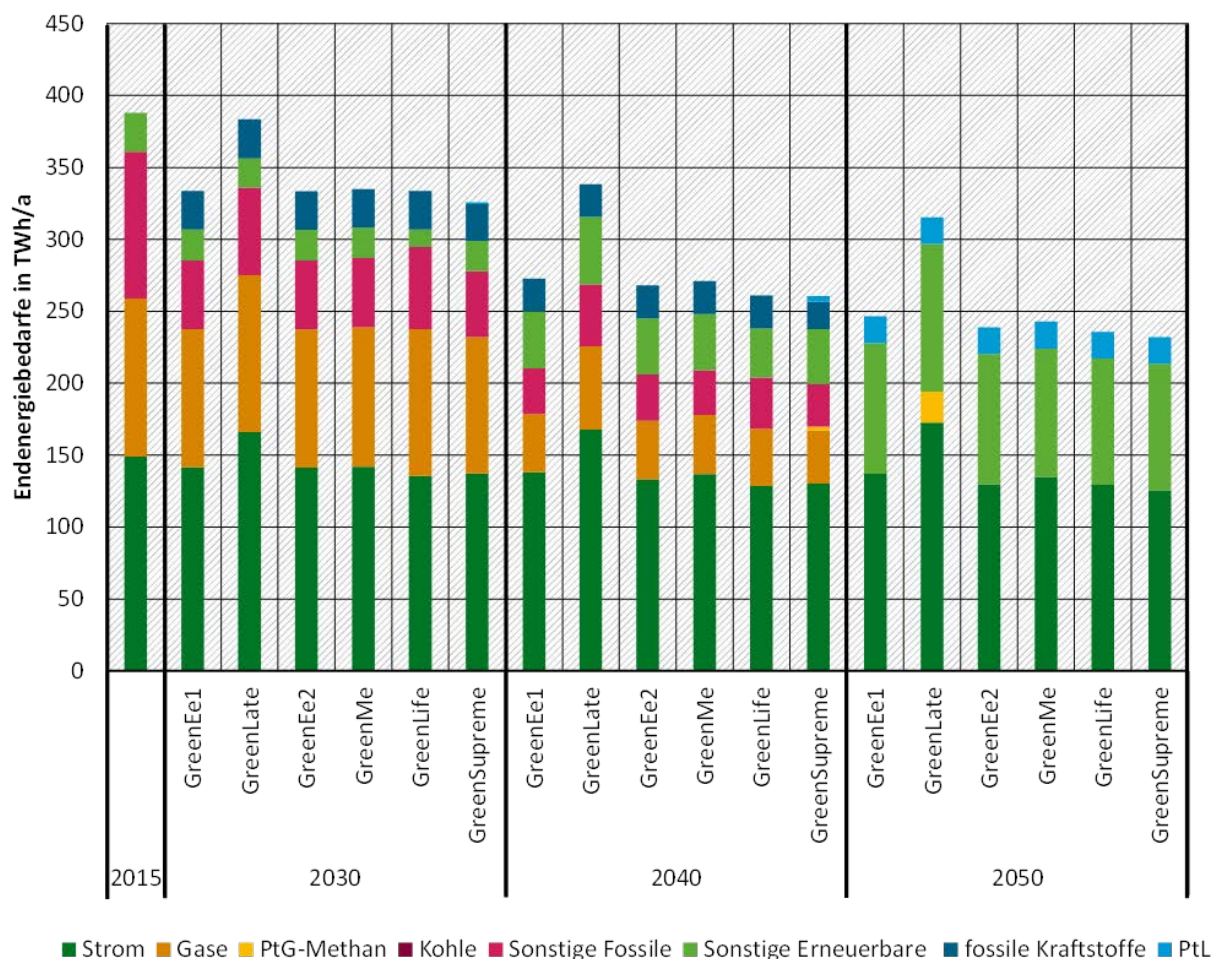
### 5.2.2.2 Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) umfasst u. a. alle Handwerksbetriebe, industrielle Kleinbetriebe, Baugewerbe, Einzel- und Großhandel, Handelsvermittlungen, Krankenhäuser, Schulen (inkl. Universitäten), Bäder, Beherbergung und Gaststätten, büroähnliche Betriebe wie Kreditinstitute und Bereiche der Land- und Forstwirtschaft und des Militärs. Diese Heterogenität spiegelt sich in den Endenergiebedarfen wieder. Neben den Raumwärme- und Warmwasserbedarfen der Nicht-Wohngebäude dieses Sektors, siehe dazu Kapitel 5.3, wird ein Großteil der Energie für mechanischen Antriebe und Prozesswärme benötigt. Für Baumaschinen, landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche und militärische Fahrzeuge werden darüber hinaus in diesem Bereich Kraftstoffe benötigt.

Bereits heute wird vornehmlich Strom im GHD-Bereich benötigt. 2015 waren es mit 150 TWh rund 38 % des Endenergiebedarfs im GHD-Sektor (BMW, 2019a). In Abbildung 5-14 ist die Entwicklung der Endenergiebedarfe nach Energieträgern für die verschiedenen Green-Szenarien im Bereich GHD dargestellt. Durch Erschließen von Effizienzpotentialen bei den energetischen Anwendungen kann der Bedarf an Endenergie insgesamt um rund 19 % in GreenLate und um bis zu 40 % in GreenSupreme gegenüber 2015 gesenkt werden. Annahmen zu Mindeststandards, Einsatz hocheffizienter Techniken, Energiemanagement, etc. ermöglichen dies. In der Dekade nach 2030 werden zunehmend effiziente PtH-Techniken integriert, der damit einhergehende Effizienzgewinn führt dazu, dass in der Dekade nach 2030 die prozentual größten Minderungen im Bereich Energie und Treibhausgasemissionen erreicht werden. Auf

Gas als Energieträger wird bis 2050 außer in GreenLate vollständig verzichtet, da der direkte Einsatz von Strom nicht nur effizienter, sondern auch kostengünstiger im Vergleich zu PtG-Methan ist. Im Zuge der Digitalisierung und dem Anstieg entsprechender Dienstleistungen (verbunden mit Steigerung des Energiebedarfs) wird ein Großteil der Effizienzpotentiale kompensiert (Reboundeffekt).

**Abbildung 5-13: Endenergiebedarfe im Bereich GHD nach Energieträgern in den Green-Szenarien**

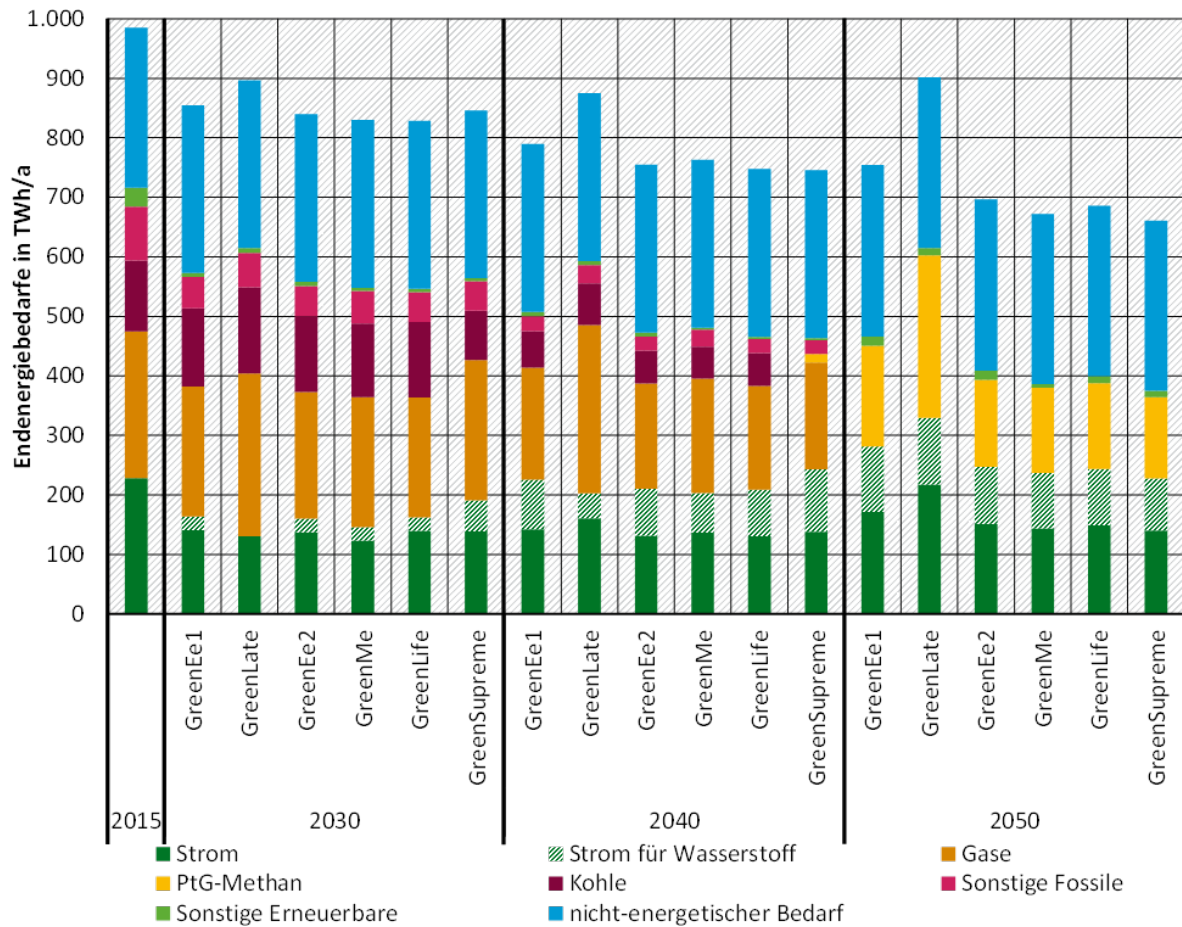


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.2.3 Industrie

Auch im Bereich Industrie werden in GreenLate die geringsten Minderungen bei den Endenergiebedarfen erreicht. In 2050 werden noch rund 900 TWh Endenergie benötigt, was nur eine geringe Reduktion von etwa 9 % gegenüber 2015 bedeutet. In GreenSupreme erfolgt aufgrund der höheren Ambitionen bei Energie- und Materialeffizienz sowie der Wachstumsbefreiung eine Reduktion um 33 % auf rund 660 TWh inklusive der nicht-energetischen Bedarfe. In der Abbildung 5-14 sind die Entwicklungen für die Industrie bis 2050 dargestellt und in Kapitel 5.5 erfolgen die ausführlichen und branchenspezifischen Ausführungen dazu.

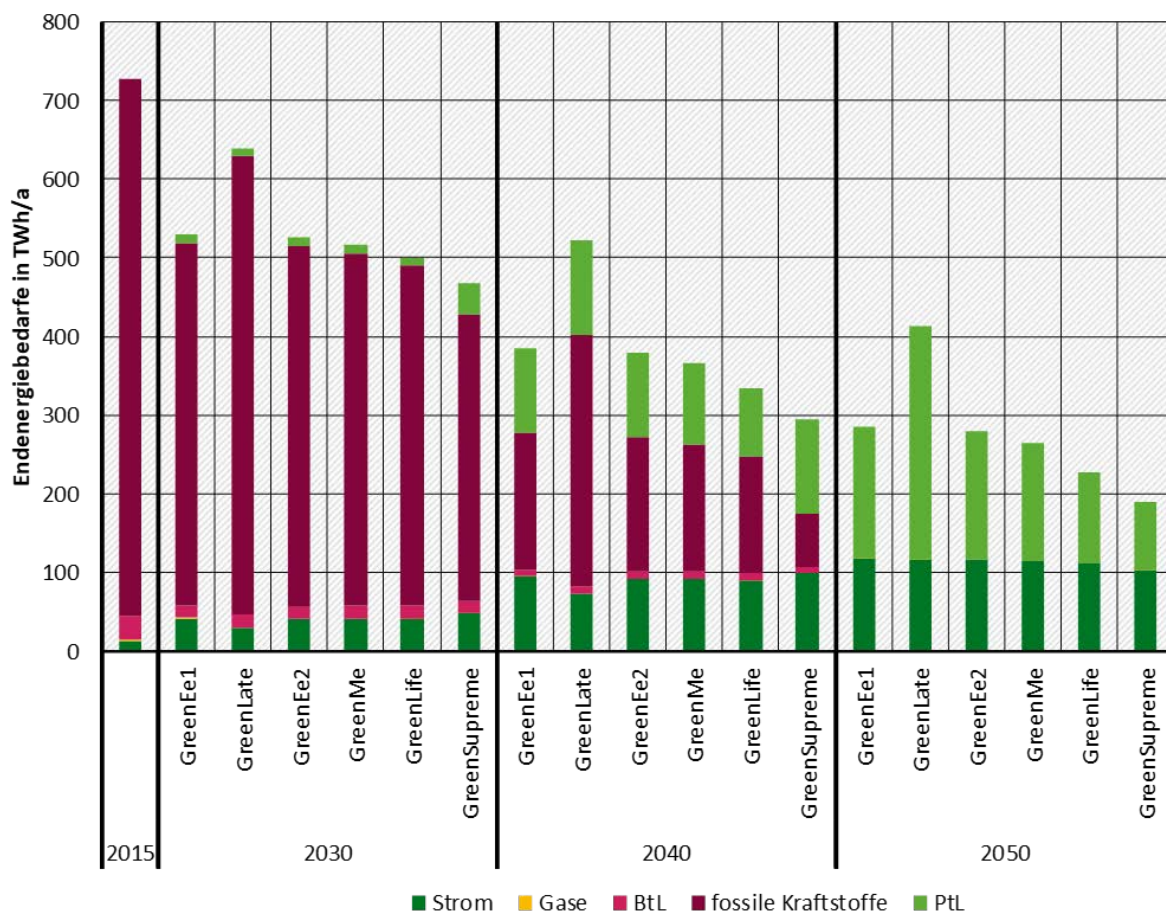


**Abbildung 5-14: Endenergiebedarfe im Bereich Industrie nach Energieträgern in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.2.4 Verkehr

Im Verkehr werden in der Studie die nationalen Verkehre sowie die von Deutschland verursachten internationalen Verkehre berücksichtigt. Darüber hinaus werden die zu transportierenden Güterverkehrsmengen modellendogen ermittelt, siehe Kapitel 5.4. In allen Green-Szenarien erfolgt eine starke Elektrifizierung. In GreenLate erfolgt diese entsprechend der Szenariencharakteristik verspätet, so dass die damit verbundenen Effizienzgewinne bis 2050 noch nicht im selben Maße ausgeschöpft werden können wie in den anderen Szenarien. GreenLate stellt mit rund 410 TWh bei einer Minderung um rund 40 % gegenüber 2015 den höchsten Endenergiebedarf dar. Der Anteil an flüssigen Energieträgern beträgt im Jahr 2050 noch 72 % (ohne Kraftstoffe im Bereich GHD). Aufgrund der beschleunigten Integration der E-Mobilität und den veränderten verkehrlichen Bedürfnissen in GreenSupreme werden hier 2050 nur gut 190 TWh benötigt, davon 45 % in Form von Strom (ohne Kraftstoffe im Bereich GHD). Abbildung 5-15 gibt einen zusammenfassenden Überblick zur Entwicklung der Endenergiebedarfe in Verkehr, detaillierte Ausführungen sind im Kapitel 5.4 zu finden.

**Abbildung 5-15: Endenergiebedarfe im Bereich Verkehr nach Energieträgern**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.2.5 Zusammenfassung

Die sich im Zuge des Transformationspfades ergebenden Endenergiebedarfe sind für die verschiedenen Szenarien in der Tabelle 5-3 zusammenfassend dargestellt.

Es wird erkennbar, dass in GreenSupreme bis 2050 gegenüber 2015 die energetischen Endenergiebedarfe um gut die Hälfte reduziert werden können. In GreenLate wird vor dem Hintergrund der Szenariencharakteristik nur eine Reduktion um etwa ein Viertel erreicht.

Offenkundig wird auch die Rolle der direkten Nutzung von Strom durch Sektorkopplung in den Green-Szenarien. Insgesamt steigt trotz Energieeffizienz der Stromverbrauch durch die Integration von Power to Heat über alle Anwendungsbereiche hinweg an. Dies trifft auch auf Elektromobilität und nationale Power to Gas-Produktion (dabei insbesondere die Wasserstofferzeugung) zu.



Tabelle 5-3: Entwicklung der Endenergiebedarfe nach Energieträgern

In TWh		Strom <sup>28</sup>	Gase <sup>29</sup>	Kohle	Sonstige Fossile	andere erneuerbare Energie	Kraftstoffe <sup>30</sup>	Summe energetisch	Rohstoffe <sup>31</sup>
<b>2015</b>		521	594	126	374	170	683	<b>2.468</b>	269
<b>2030</b>	<b>GreenEe1</b>	490	565	132	157	112	515	<b>1.971</b>	282
	<b>GreenLate</b>	480	666	145	185	87	636	<b>2.199</b>	282
	<b>GreenEe2</b>	484	559	128	156	111	513	<b>1.951</b>	282
	<b>GreenMe</b>	474	565	124	157	111	502	<b>1.933</b>	282
	<b>GreenLife</b>	461	587	127	171	237	485	<b>2.068</b>	282
	<b>GreenSupreme</b>	524	545	84	143	122	448	<b>1.866</b>	282
<b>2040</b>	<b>GreenEe1</b>	606	339	62	78	185	313	<b>1.583</b>	282
	<b>GreenLate</b>	616	498	70	110	202	472	<b>1.968</b>	282
	<b>GreenEe2</b>	581	217	55	79	183	311	<b>1.426</b>	282
	<b>GreenMe</b>	583	336	54	80	185	398	<b>1.636</b>	282
	<b>GreenLife</b>	553	341	55	83	123	267	<b>1.422</b>	282
	<b>GreenSupreme</b>	620	306	0	70	179	218	<b>1.393</b>	282
<b>2050</b>	<b>GreenEe1</b>	671	169	0	0	279	186	<b>1.305</b>	282
	<b>GreenLate</b>	796	329	0	0	328	315	<b>1.768</b>	282
	<b>GreenEe2</b>	627	146	0	0	279	183	<b>1.235</b>	282
	<b>GreenMe</b>	621	143	0	0	267	169	<b>1.200</b>	282
	<b>GreenLife</b>	609	144	0	0	235	132	<b>1.120</b>	282
	<b>GreenSupreme</b>	580	136	0	0	236	104	<b>1.056</b>	282

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.3 Entwicklung der Stromversorgung

In Abbildung 5-16 ist die Entwicklung der Stromerzeugung in den verschiedenen Green-Szenarien im Überblick dargestellt. Wie bereits in Kapitel 0 gezeigt, steigen in allen Szenarien durch die Integration neuer Stromverbraucher die direkten Strombedarfe bis 2050 an. Vor dem Hintergrund der zunehmenden fluktuierenden Stromerzeugung und der gebotenen Versorgungssicherheit wird unterstellt, dass über den europäischen Stromnetzverbund ein reger Stromaustausch erfolgt und damit ein Beitrag zur Versorgungssicherheit erbracht wird. Gleichfalls wird bilanziell von einer ausgeglichenen jährlichen Stromhandelsbilanz ausgegangen. Weiterhin wird für einige Verbraucher Flexibilität beim Zeitpunkt des Stromverbrauches

<sup>28</sup> Ab 2050 vollständig Erneuerbar. Bis 2050 Strom aus sowohl fossilen als auch erneuerbaren Energiequellen zusammengefasst.

<sup>29</sup> Ab 2050 vollständig Erneuerbar. Bis 2050 sowohl fossile als auch erneuerbare Gase zusammengefasst.

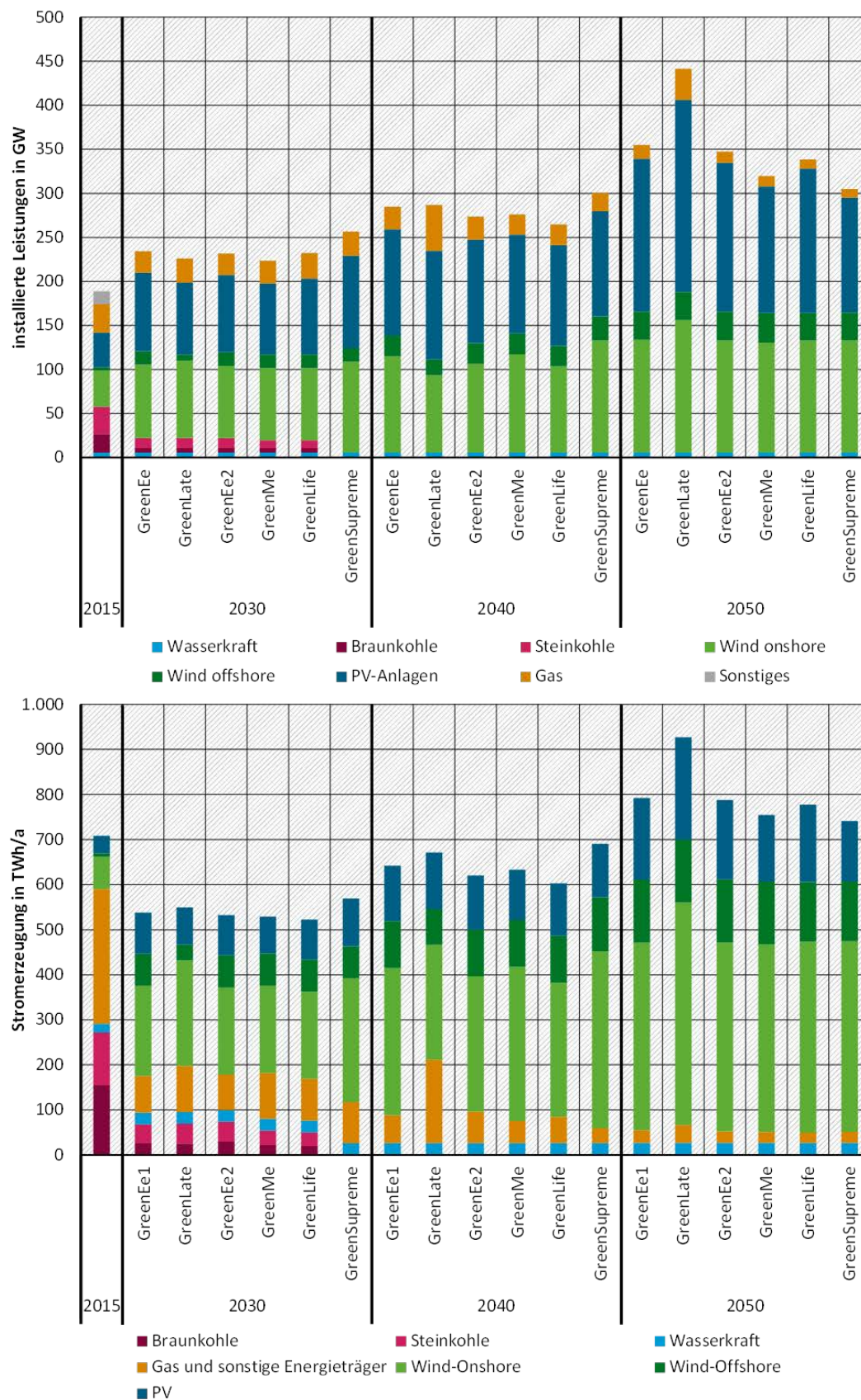
<sup>30</sup> Ab 2050 vollständig Erneuerbar. Bis 2050 sowohl fossile als auch erneuerbare Kraftstoffe zusammengefasst.

<sup>31</sup> Ab 2050 vollständig Erneuerbar. Bis 2050 sowohl fossile als auch erneuerbare Rohstoffe zusammengefasst.

unterstellt. Dies betrifft die Elektromobilität im Personen- und Güterverkehr, die Raumwärmeversorgung und PtG-Anlagen in der Wasserstoffwirtschaft sowie PtG-Methan-Anlagen, welche zur allgemeinen Brennstoffversorgung produzieren. Der Einsatz dieser zu- und abschaltbaren Lasten wird modellendogen ermittelt, um die erneuerbare Stromerzeugung effektiv zu gestalten und den Bedarf an gasbasierten Back-up-Kraftwerken zu begrenzen. Ein gängiges Beispiel hierfür sind hybride Systeme zur Wärmeversorgung. So kann durch den Wechsel zwischen PtH und erneuerbarem Gas in KWK-Anlagen sowohl in Stunden mit hoher erneuerbarer Stromerzeugung (zuschaltbare Last einer PtH-Technik mit Wärmespeicherung) als auch in Stunden geringer Erzeugung (Wärmeversorgung wird gasbasiert gewährleistet und bei Bedarf darüber hinaus Strom bereitgestellt) ein systemdienlicher Beitrag geleistet werden, siehe (UBA, 2020a) für nähere Details. Für die neu zu integrierenden Prozesstechniken in der Industrie wurden keine Flexibilitäten unterstellt, so dass insgesamt das Flexibilitätspotential als konservativ beurteilt werden kann. Mit den Annahmen zur Flexibilisierung und unter der Voraussetzung ausreichenden Netzausbaus wird die Abregelung der erneuerbaren Energien in Deutschland in allen Szenarien und allen Stützjahren auf unter 1 % der Nettostromerzeugung begrenzt.

Zur stabilen Stromversorgung kommen außerdem Pumpspeicherwerke, siehe Kapitel 5.2.3.2.5, Rückverstromung von PtG-Methan, siehe Kapitel 5.2.3.1, und Batteriespeicher zum Einsatz. Letztere nur im geringen Umfang nach 2040. Etwa in GreenLate leisten Batteriespeicher mit knapp 6 TWh Rückeinspeisung in 2050 den größten Beitrag, siehe Abbildung 5-16. Aus Gründen der effektiven Rohstoffnutzung kommen nur Batteriespeicher in der Stromversorgung zum Einsatz, die zuvor in der Elektromobilität verwendet wurden und dort für den Fahrzeugbetrieb nicht mehr einsetzbar sind (Mostert et al., 2018). Diese weisen noch rund 70 % der ursprünglichen Speicherkapazität auf, welche ausreichend für die stationäre Stromspeicherung ist. Da ein höherer Anteil an Fahrzeugbatterien aufgrund verringerter Kapazität den Mobilitätssektor verlässt als Bedarf für stationäre Anwendungen besteht, entsteht durch die verzögerte Bereitstellung durch die Second-Life-Nutzung kein Versorgungsengpass für das Batterierecycling.

Unter den Erzeugungstechniken wird, wie in Abbildung 5-16 deutlich zu erkennen, Wind onshore zur tragenden Säule der Stromversorgung. In allen Szenarien werden 2050 mehr als 50 % des benötigten Stroms aus Windenergie an Land bereitgestellt, deren Erzeugung gegenüber der im Jahr 2015 näherungsweise um das viereinhalbfache bis hin zu mehr als dem fünffachen in GreenLate steigt (siehe Kapitel 5.2.3.2.1.1). Photovoltaik leistet in den Szenarien jeweils den zweitgrößten Beitrag zur nationalen Stromversorgung, für nähere Erläuterung siehe Kapitel 5.2.3.2.1.2. Der Beitrag von Wind offshore in 2050 beträgt in den Green-Szenarien max. 18 % der Stromversorgung (siehe Kapitel 5.2.3.2.4), in GreenLate nur rund 15 %. Erneuerbare Gase aus Gülle oder anderen biogenen Reststoffen, Geothermie und sonstige Energieträger spielen in allen Green-Szenarien nur eine untergeordnete Rolle (in Summe immer weniger als 4,5 % an der Gesamtstromerzeugung). Insbesondere in den Jahren nach 2030 ist die Relevanz von fossilem Erdgas in allen Szenarien zu beachten. Gleichwohl die Ausprägung sehr unterschiedlich entsprechend der Grundgedanken der Szenarien ist, siehe dazu Kapitel 5.2.3.1.

**Abbildung 5-16: Entwicklung der Stromerzeugung in den Green-Szenarien: oben installierte Leistung und unten Stromerzeugung**

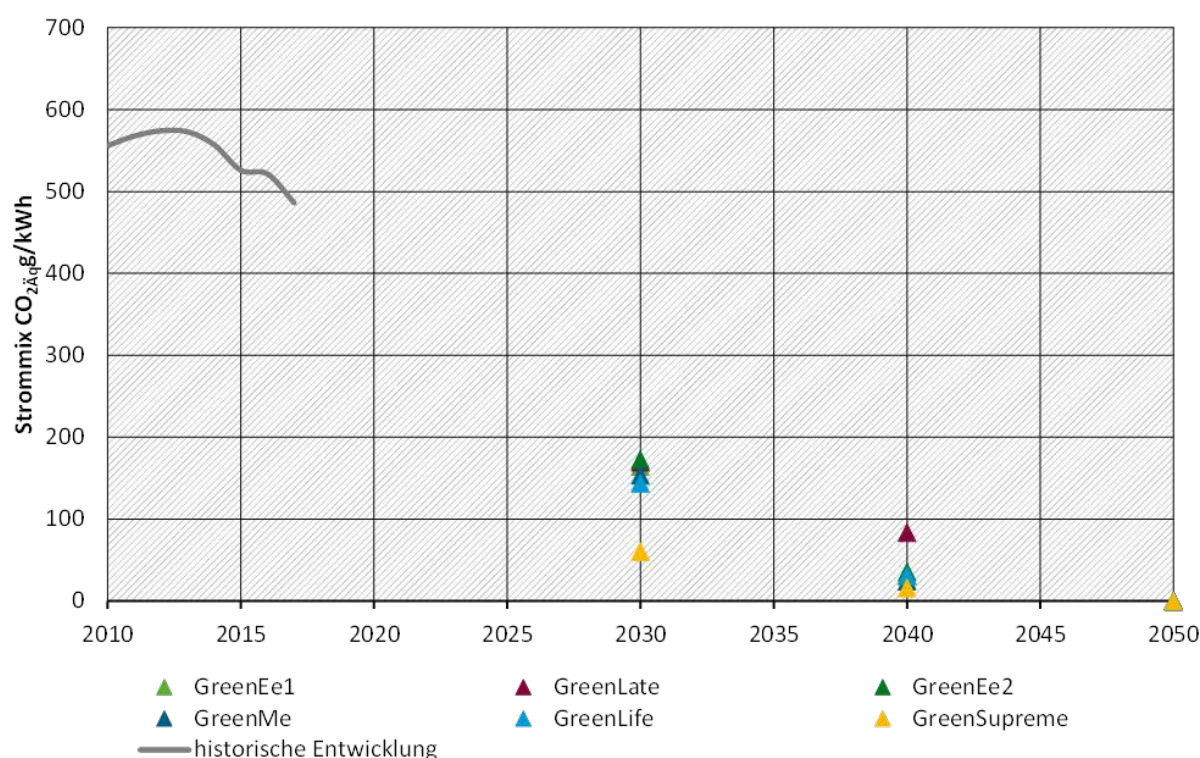
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)



In allen Szenarien ist bereits 2030 der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung über 70 %, siehe Abbildung 5-34. Die Kohleverstromung endet in allen Szenarien in der Dekade nach 2030, siehe Kapitel 5.2.3.1. In GreenSupreme erfolgt bereits 2030 keine Kohlenutzung zur Stromversorgung mehr. Fossiles Gas ist erst in 2050 vollständig substituiert. Selbst in GreenSupreme erfolgt bis in die Dekade nach 2040 eine marginale Verstromung von fossilem Erdgas. In 2040 basiert die Stromversorgung zu über 90 % in allen Szenarien, bis auf GreenLate, auf erneuerbaren Energien, in GreenSupreme sogar 97 %. Erst 2050 kommen ausschließlich erneuerbare Energien in der Stromversorgung zum Einsatz. Dies spiegelt sich auch in der durchschnittlichen Emissionsbelastung des Stromes, wie in Abbildung 5-17 zu sehen ist, wider. In GreenSupreme sinkt die CO<sub>2</sub>-Belastung im Strommix bereits 2030 auf 60 gCO<sub>2</sub>Äq/kWh und beträgt 2040 nur noch etwa 16 gCO<sub>2</sub>Äq/kWh. Die anderen Szenarien reduzieren bis 2030 auf 143 bis 172 gCO<sub>2</sub>Äq/kWh. 2040 liegt in GreenLate mit 83 gCO<sub>2</sub>Äq/kWh die durchschnittliche THG-Belastung im Strom mehr als fünfmal höher als in GreenSupreme, zweieinhalbmal höher als GreenEe1, GreenEe2 und GreenLife und dreieinhalbmal höher als in GreenMe.

In den nachfolgenden Kapiteln wird detaillierter auf die Umstrukturierung des konventionellen und erneuerbaren Kraftwerksparkes sowie den damit verbundenen Herausforderungen im Transformationspfad eingegangen.

**Abbildung 5-17: Entwicklung Emissionsbelastung im Strommix in den Green-Szenarien bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (UBA, 2019f) und (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.3.1 Entwicklung des konventionellen Kraftwerksparkes in Deutschland

Zentraler Baustein der Klimaschutz- und Ressourcenschutzbestrebungen ist die Umstrukturierung des konventionellen Kraftwerksparkes und die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien.

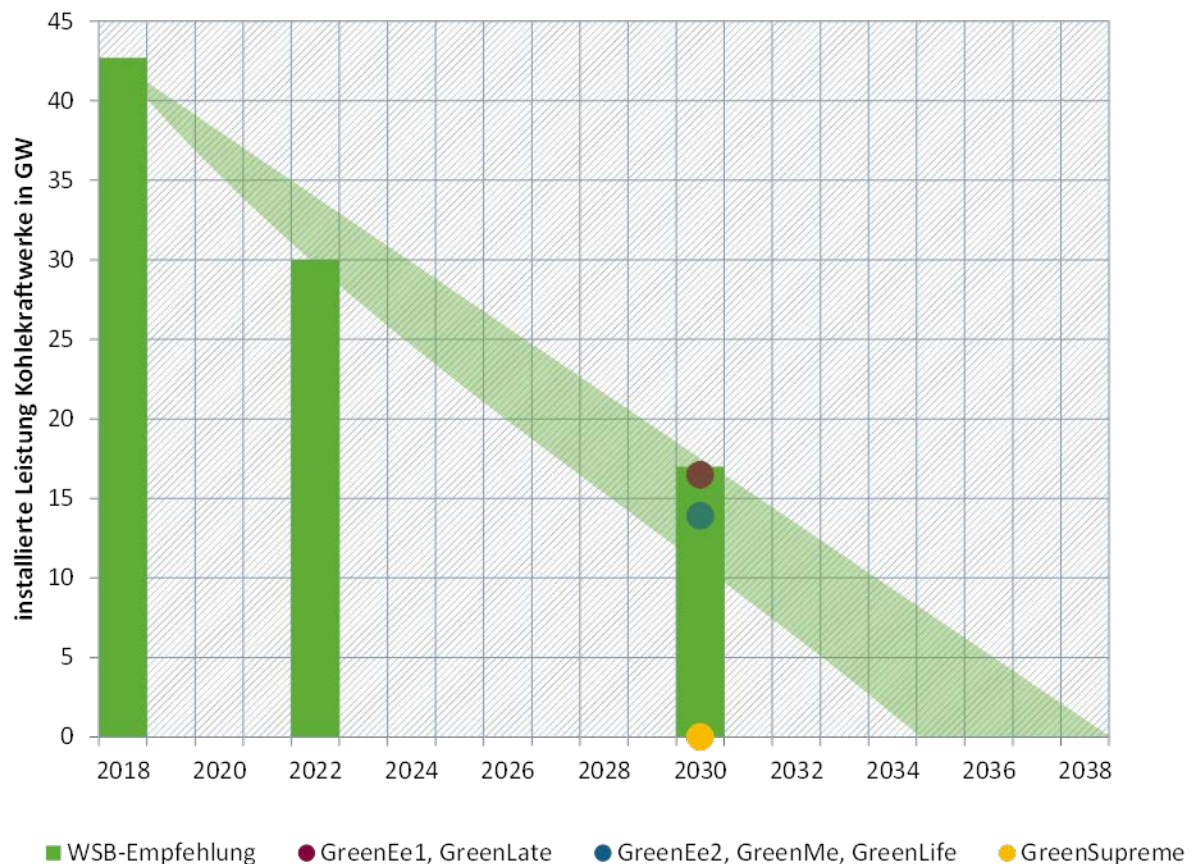
Die fossile Stromerzeugung verursachte 2017 etwa 32 % der Gesamtreibhausgasemissionen in Deutschland. Durch die sukzessive Stilllegung von Kohlekraftwerken können kurz- und



mittelfristig hohe Treibhausgasminderungseffekte und Rohstoffeinsparungen erzielt werden. Eine geordnete Stilllegung von Kohlekraftwerken sorgt dabei für einen planbaren Strukturwandel in den Braunkohleregionen und muss durch einen verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien begleitet werden.

Die Stilllegung von Kohlekraftwerken erfolgt entsprechend der Szenariencharakteristik, siehe Kapitel 3. Durch unterstellte Stilllegungen sind im Jahr 2030 ausschließlich Braunkohlekraftwerke in Betrieb, die weniger als 30 Betriebsjahre aufweisen. Dies sind knapp 5,2 GW. Bei der Steinkohle wird für GreenEe1 und GreenLate bis 2030 eine Stilllegung aller Kraftwerke mit mehr als 40 Betriebsjahren unterstellt, so dass sich die Erzeugungskapazitäten bis 2030 auf gut 11 GW reduzieren. Für die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife werden für Braun- und Steinkohlekraftwerke die identischen Vorgaben zur Betriebsdauer unterstellt. Dementsprechend liegt die Steinkohlekapazität in diesen Szenarien bei knapp 9 GW in 2030.

Die von der Bundesregierung eingesetzte Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (WSB-Kommission) hat in ihrem Abschlussbericht (BMU, 2019a) ein Ende der Kohleverstromung im Jahr 2038 vorgeschlagen, mit der Option das Abschlussdatum auf 2035 vorzuziehen. Bis zum Jahr 2030 sollen, laut WSB-Kommission, maximal 9 GW Braunkohle- und 8 GW Steinkohlekraftwerke am Markt sein. Die WSB-Kommission empfiehlt also bis zum Jahr 2030 ähnlich hohe Stilllegungen für Kohlekraftwerke, wie in den Green-Szenarien unterstellt wurde. Gleichwohl wird in den Green-Szenarien die installierte Braunkohlekapazität schneller und die Steinkohlekapazitäten langsamer reduziert, als von der WSB-Kommission empfohlen. Abbildung 5-18 zeigt einen Vergleich der Annahmen in dieser Studie und der Empfehlungen der WSB-Kommission. Bei einer stetigen und linearen Fortführung der Stilllegungen würden die Abschlussdaten für die Kohleverstromung in den Green-Szenarien (außer GreenSupreme) im Bereich der Empfehlungen der WSB-Kommission liegen. In GreenSupreme erfolgt bereits 2030 keine Kohleverstromung mehr. Dieses höhere Ambitionsniveau ist erforderlich, um Treibhausgasemissionen schnell zu reduzieren und den internationalen Bestrebungen zur Eindämmung der globalen Erwärmung unterhalb von 1,5 °C gerecht zu werden.

**Abbildung 5-18: Kohlekraftwerke in den Green-Szenarien im Vergleich zu den Empfehlungen der WSB-Kommission**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (BMU, 2019a; Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die in den Szenarien erforderlichen Treibhausgasminderungen bis 2030, siehe Kapitel 6.1.1.1, führen zusätzlich zu den unterstellten Stilllegungen modellendogen zu einer Reduzierung der Volllaststunden der verbliebenen Braunkohlekraftwerke, so dass vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit u.U. eine größer als angenommene Kapazitätsreduzierung erfolgen würde. Die Volllaststunden der Steinkohlekraftwerke liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie heute. Insgesamt reduziert sich der Beitrag der Kohleverstromung (Braun- und Steinkohle) von 34,4 % (BMWi, 2019a) an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2018 auf maximal 14 % in 2030, siehe Tabelle 5-4.

Die Stilllegung von Kohlekraftwerken sollte durch einen aktiv gestaltete Struktur- und Regionalpolitik in den Braunkohleregionen begleitet werden, so dass soziale Härten vermieden und eine nachhaltige regionalwirtschaftliche Entwicklung gefördert wird. Die WSB-Kommission hat dafür eine Reihe von Maßnahmen zur Strukturentwicklung vorgeschlagen und setzt dabei auf eine anspruchsvolle wirtschaftliche Entwicklung. Insbesondere werden Maßnahmen im Bereich Regionalentwicklung, Raumplanung, Energiepolitik, Arbeitsmarktpolitik, Verkehrsinfrastruktur, Wirtschaftsförderung, Forschung und Entwicklung und Wissenschaft vorgeschlagen (BMU, 2019a). Dabei sollen die Maßnahmen im Einklang mit Umwelt- und Arbeitsstandards stehen, daher sollen nur Projekte gefördert werden, die im Einklang mit den international vereinbarten sustainable development goals (SDG) stehen und insbesondere eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wirtschaft fördern.

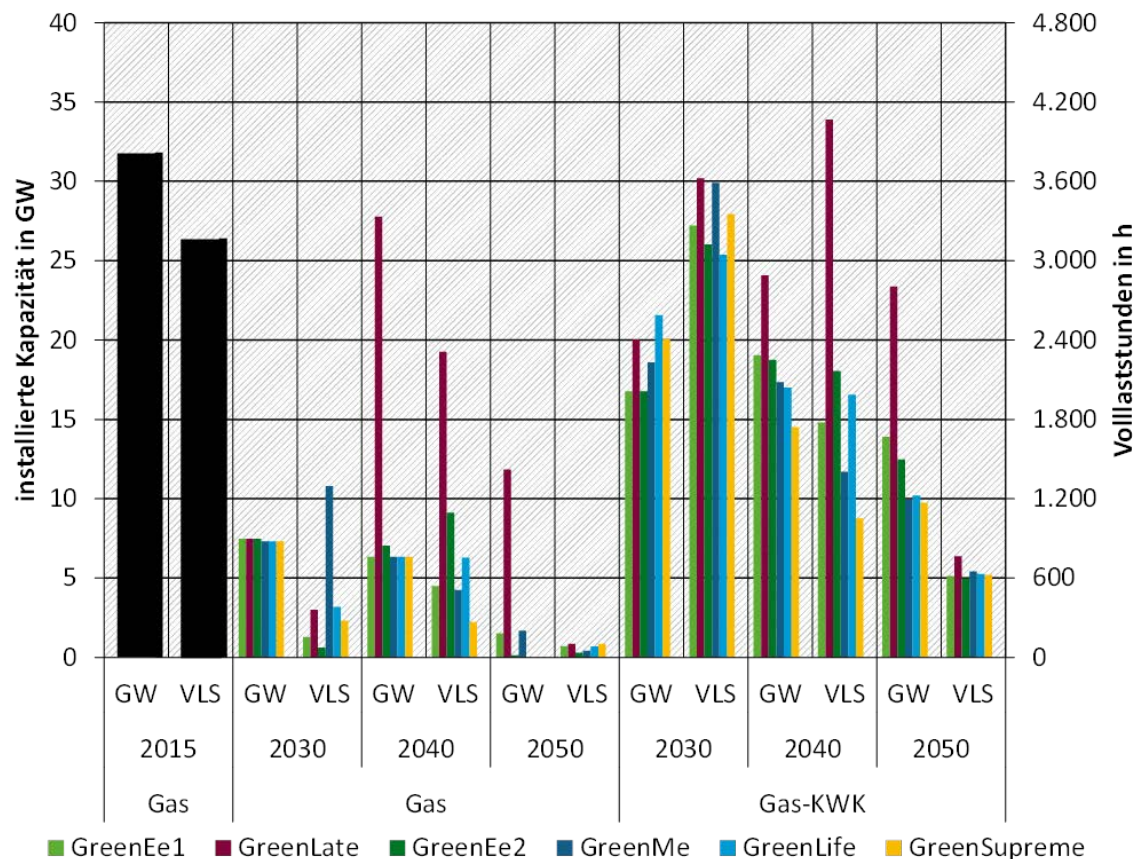
**Tabelle 5-4: Beitrag von Kohle zur Stromerzeugung 2030 in den Green-Szenarien**

	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
Stromerzeugung in TWh	68	69	74	59	50	0
Anteil an der Bruttostromerzeugung	12,6 %	12,6 %	13,9 %	11,2 %	9,6 %	0 %

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Anders als Kohlekraftwerke werden Gaskraftwerke<sup>32</sup> auch zukünftig für eine sichere Energieversorgung Deutschlands benötigt, mindestens als Back-up-Kraftwerke. Aus der Modellierung der Green-Szenarien ergibt sich ein differenziertes Bild auch deshalb, da keine exogenen Maßnahmen oder Annahmen unterstellt wurden. Es wurde lediglich davon ausgegangen, dass Gaskraftwerke nach 40 Jahren Betriebsdauer außer Betrieb gehen und bei Bedarf ersetzt werden. Im GreenLate-Szenario, wo grundsätzlich ein ineffizienterer Pfad mit höheren Gasbedarfen im Vergleich zu den anderen Szenarien skizziert wird und bei dem die Treibhausgasminderungen bis 2040 in der Energieversorgung geringer sind, ergibt sich ein Ausbau der Gas-KWK-Kapazitäten und zwischenzeitlich auch mit einem erhöhten Bedarf an Gasturbinen. In 2050 ist in GreenLate eine höhere installierte Leistung an gasbasierten Kraftwerken als heute zu verzeichnen. Die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife zeigen nach 2030 bis 2050 eine deutliche Reduzierung der Gaskraftwerke, wohingegen in 2030 und 2040 noch ein Zubau an Gas-KWK-Anlagen im Vergleich zu heute zu verzeichnen ist, der bis 2050 jedoch wieder unter 5 GW und unter den heutigen Kapazitäten liegt. Die Volllaststunden der Gasturbinen begrenzen sich in allen Green-Szenarien auf wenige Stunden, und auch bei den gasbasierten KWK-Systemen ist eine deutliche Reduktion der Volllaststunden zum heutigen Stand zu erkennen, siehe Abbildung 5-19.

<sup>32</sup> Gaskraftwerke basieren zunehmend nach 2040 auf erneuerbaren Gasen, siehe Kapitel 5.2.4.

**Abbildung 5-19: Entwicklung der Gaskraftwerke in den Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

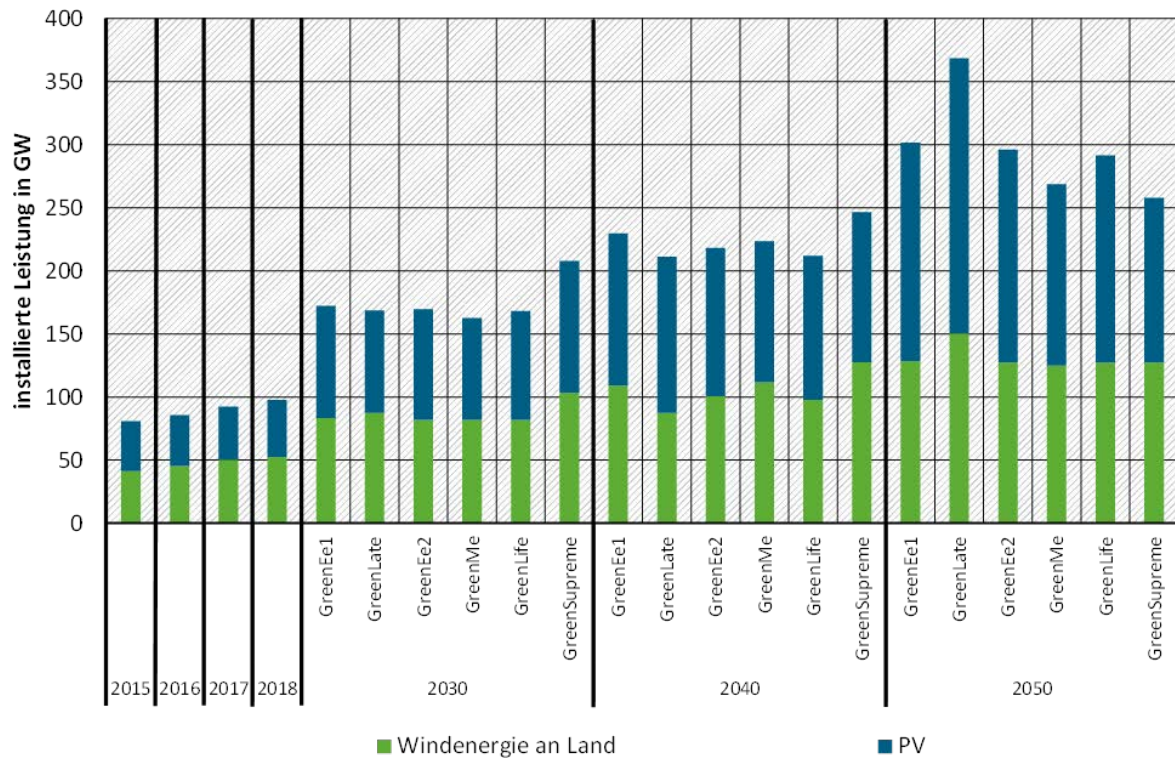
### 5.2.3.2 Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland

Die notwendigen Ausbaupfade der erneuerbaren Energien zur Stromversorgung werden im Wesentlichen beeinflusst durch

- ▶ das avisierte Treibhausgasminderungsziel sowohl in den Stützjahren als auch für 2050,
- ▶ die Entwicklungen zum zu deckenden Strombedarf, der sowohl von Effizienzmaßnahmen also auch der Integration von Sektorkopplungstechniken abhängt und
- ▶ den Rückbau von erneuerbaren Energieanlagen entsprechend ihrer Lebensdauer.

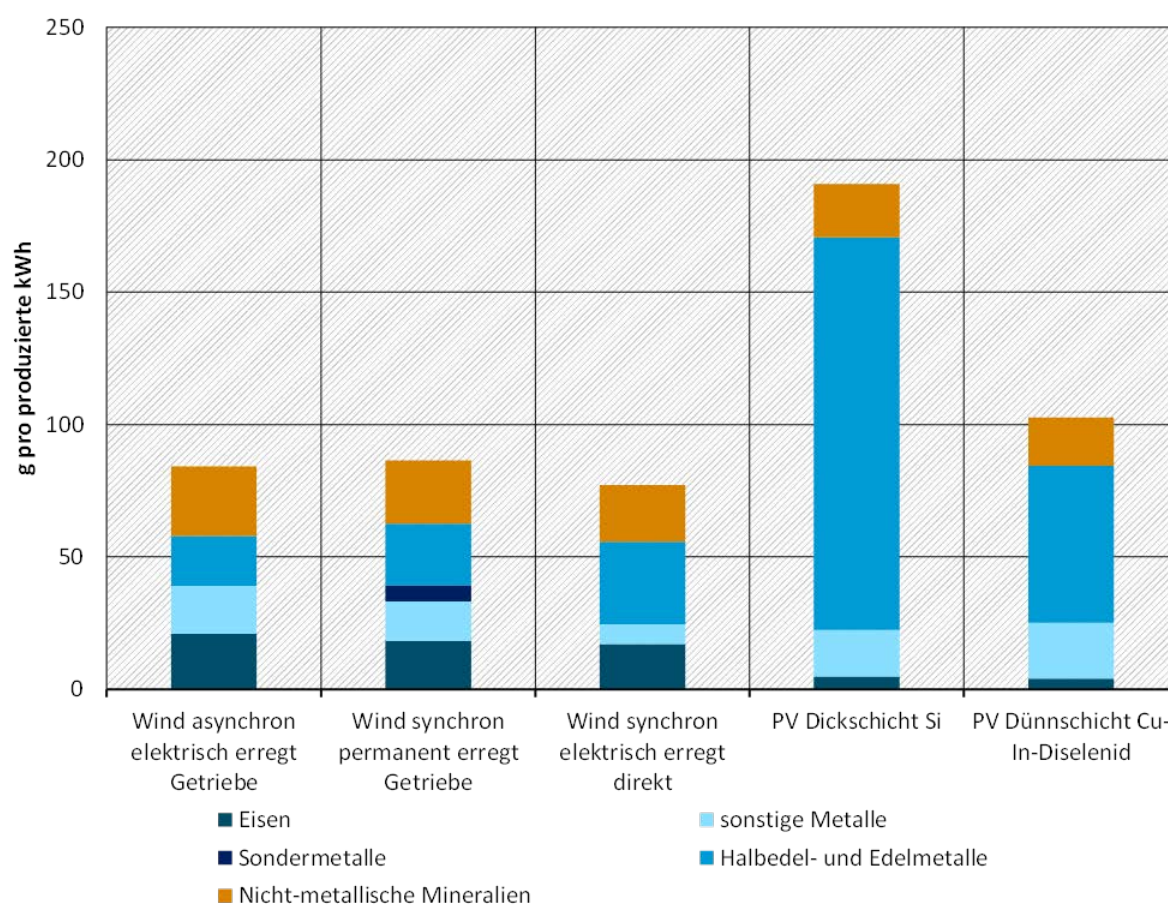
Entsprechend der Szenariencharakteristik (siehe Kapitel 3) wird mit den Green-Szenarien eine Bandbreite von möglichen Entwicklungen aufgezeigt, die sowohl bezüglich des erforderlichen Ausbaus als auch der Inanspruchnahme der Rohstoffe variiert. Um die in 2050 erzeugten Strommengen der Green-Szenarien auf Basis von Windenergie und PV gewährleisten zu können, ist eine deutliche Steigerung der installierten Kapazitäten beider Technikoptionen notwendig (siehe Abbildung 5-20).



**Abbildung 5-20: Installierte Leistung von Windenergie an Land und Photovoltaik in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMW, 2019b)

Dabei gilt es je nach Szenario eine entsprechende Wahl der Technologie für den Zubau zu treffen, da diese maßgeblich den Primärrohstoffbedarf beeinflussen können (z. B. (Månberger & Stenqvist, 2018; UNEP, 2016; Wiesen et al., 2017) wie in Abbildung 5-21 zu sehen ist.

**Abbildung 5-21: Ausgewählte Rohstoffnutzung einiger Energieerzeugungsanlagen nach heutigem Stand**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Wiesen et al., 2017)

### 5.2.3.2.1 Notwendige Ausbaupfade für erneuerbare Energien

Ausgehend vom Stand Ende 2018 mit einer installierten Leistung von 52,5 GW bei Windenergie an Land und 45,3 GW bei Photovoltaik ist in allen Szenarien jeweils eine Steigerung der installierten Leistung um ca. 30 GW auf mehr als 80 GW in 2030 notwendig. Der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch steigt damit in den Green-Szenarien auf mind. 70 %. Bis 2030 entspricht der erforderliche Kapazitätszubau der Green-Szenarien dem Ausbau, der im Szenarioahmen B des Netzentwicklungsplans (NEP) 2030 vorgesehen ist, gleichwohl dort nur ein Anteil von 65 % am Bruttostromverbrauch bis 2030 unterstellt ist. Dieser Unterschied ist vor allem in den ambitionierten Annahmen zur Reduktion des Stromverbrauchs in den Green-Szenarien begründet (siehe Tabelle 5-3).<sup>33</sup> Damit wird deutlich, wie entscheidend der Einfluss von Effizienzmaßnahmen und Energieeinsparungen für eine erfolgreiche Transformation des Energiesystems und für den Ausbaubedarf der erneuerbaren Energien ist. Im Szenario GreenSupreme ist vor dem Hintergrund der ambitionierteren Treibhausgasminderung bereits 2030 für beide Techniken eine installierte Kapazität von jeweils über 100 GW erforderlich.

Im Folgenden wird dargestellt, wie hoch der jährliche Zubau der Windenergie an Land und der Photovoltaik ist. Neben klima- und umweltpolitischen Erfordernissen wird dabei auf industriepolitische Erwägungen eingegangen, ausgehend von der Prämisse, dass eine möglichst gleichmäßige und planbare Marktentwicklung ohne abrupte Richtungswechsel mit deutlichen

<sup>33</sup> Neben den im Modell getroffenen Annahmen wie z. B. Volllaststunden der einzelnen erneuerbaren Energietechniken.

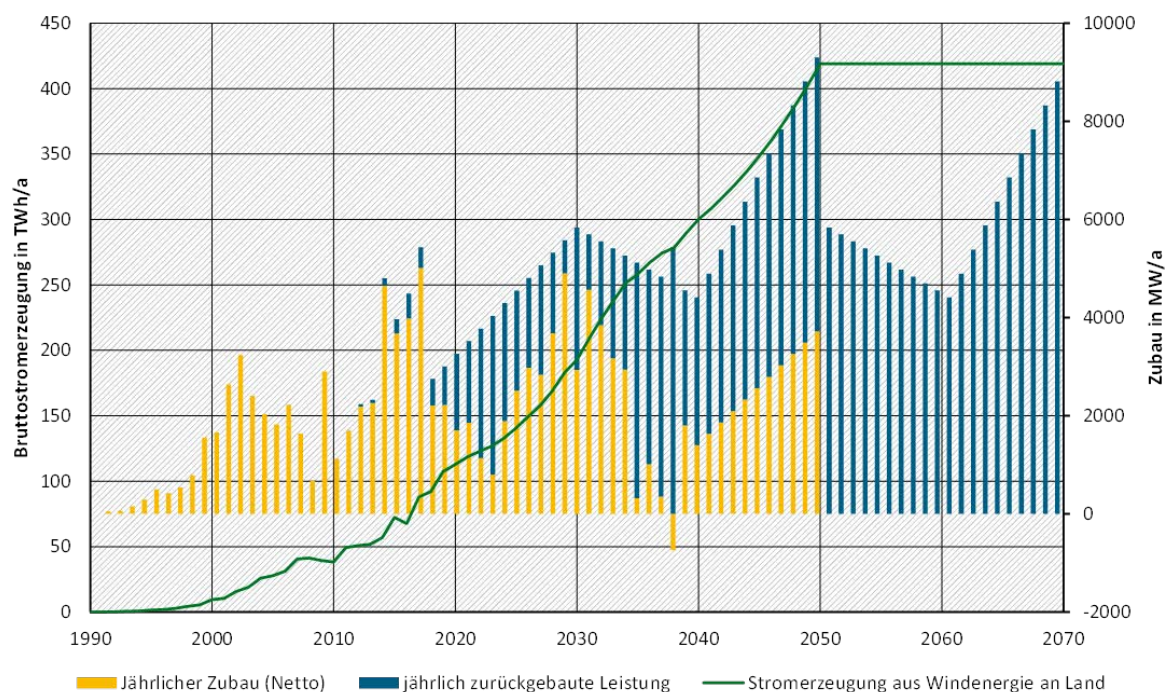
Vorteilen verbunden ist. Dies erhöht die Planungs- und Investitionssicherheit für die Branchen der erneuerbaren Energien einschließlich der Zulieferindustrie, vermeidet Fehlinvestitionen und ist ein wesentlicher Faktor, dass im Inland eine solide industrielle und wirtschaftliche Basis für die Energiewende entsteht. Eine „stop-and-go“-Politik, die zunächst den Ausbau stark stimuliert und anschließend, etwa aus kurzfristigen Kostengründen oder zum Erhalt der Netzstabilität, wieder stark drosselt, führt zu wirtschaftlichen Anpassungsfriktionen, im Extremfall sogar zu einem Markteinbruch in der betreffenden EE-Branche. Dies treibt die gesamtwirtschaftlichen Kosten des Ausbaus in die Höhe und ist industriepolitisch negativ (siehe auch TextBox 5-1).

#### 5.2.3.2.1.1 Windenergie an Land

Der notwendige Ausbaupfad hängt entscheidend von der angesetzten Lebensdauer der Anlagen ab, da der Rückbau am Ende der jeweiligen Nutzungsdauer die verfügbare, gesamt-installierte, Leistung reduziert. In allen Green-Szenarien wird eine Lebensdauer der Turbinen von 20 Jahren zuzüglich des (anteiligen) Inbetriebnahmejahres unterstellt, was dem aktuellen Förderrahmen des EEG 2017 entspricht. In Abbildung 5-22 wird exemplarisch für das GreenEe2-Szenario und dem darin ermittelten Ausbauniveau für Windenergie an Land der notwendige Nettozubaupfad<sup>34</sup>, der sich aus der Lebensdauer ergebende Rückbau und der Bruttozubaupfad als Summe von Nettozubaupfad und Rückbaupfad dargestellt.

Wie in Kapitel 5.2.3.2.1 beschrieben, sollten bei der Ermittlung des erforderlichen Ausbaus große Sprünge beim jährlichen Bruttozubaupfad vermieden werden, um allen Akteuren neben den hohen notwendigen Klimaschutzambitionen langfristige Planungssicherheit zu ermöglichen.

**Abbildung 5-22: Szenario GreenE2- Windenergie an Land: Berechneter Nettozubaupfad, Rückbaupfad, Bruttozubaupfad und Stromerzeugung.**



Quelle: eigene Darstellung und eigene Berechnungen auf Basis der Szenarien Ergebnisse des GreenEe2 (Dittrich et al., 2020a)

<sup>34</sup> Der jährliche Nettoausbau ergibt sich aus der in einem Jahr zugebauten Leistung (Bruttozubaupfad) abzüglich der im gleichen Jahr zurückgebauten Leistung.



Deshalb wurde zwischen den modellendogen ermittelten installierten Leistungen für die berechneten Stützjahre eine stetige Veränderung des jährlichen Bruttozubaues unterstellt. Dabei wurde immer der Bruttozubau des Startstützjahres (für den jeweiligen Zeitraum) als Ausgangspunkt gewählt. Wie stark der Ausbau sich jährlich zwischen den Stützjahren ändert, hängt dabei entscheidend vom zu erreichenden Ausbaustand der vorherigen und nachfolgenden Stützjahre ab. Auch die Höhe des jährlichen Bruttozubaues in einem Stützjahr hat einen Einfluss. Fände in 2018 beispielsweise kein Zubau statt (also 0 GW/a brutto), müsste der Bruttoausbau in den Folgejahren stärker ansteigen, um 2030 die entsprechende Leistung zu erreichen. Zudem ergäbe sich im Stützjahr 2030 selbst ebenfalls ein höherer Bruttoausbau als in Abbildung 5-22 dargestellt. Legt man den Zubau des Jahres 2018 bei Windenergie an Land von 2,75 GW als Ausgangspunkt zu Grunde, ergibt sich die in Abbildung 5-22 dargestellte Entwicklung des Netto-/Bruttozubaues und des Rückbaus für das GreenEe2-Szenario. Es wird deutlich, dass sich der Zubau bis 2030 noch hauptsächlich aus einem Zusatzbedarf an Nettokapazität ergibt (gelben Säulen in der Abbildung). Nach 2030 wird der zu ersetzende Rückbau (blaue Säulen) zum entscheidenden Faktor für den notwendigen Bruttozubau (hier dargestellt als Summe der jährlich zurückgebauten Leistung und des Nettozubaues, also Summe aus gelben und blauen Säule). Aufgrund der unterstellten stetigen Änderung des benötigten Bruttozubaues in GreenEe2 steigt der jährliche Bruttozubau bis auf ca. 6 GW/a im Jahr 2030 an. Der jährliche Bruttozubau in diesem Zeitraum wird pro Jahr um ca. 275 MW/a gesteigert. Bis 2040 sinkt der jährlich Zubaubedarf leicht auf 4,4 GW ab um dann bis 2050 auf 9,3 GW anzusteigen.

Angesichts der bereits absehbaren Herausforderungen für den Zubau von Windenergieanlagen an Land (siehe Kapitel 5.2.3.2.2.1) könnte es in den nächsten Jahren zu Verzögerungen kommen. Wie bereits erwähnt, beeinflusst der Ausbau eines Jahres unmittelbar die Folgejahre und die notwendige Steigerung des Ausbaus. Bleibt der Zubau zunächst unter dem erforderlichen Niveau, ist ein deutlich steilerer Anstieg des jährlichen Zubaues bis 2030 notwendig, um Defizite zu kompensieren und dennoch das angestrebte Ausbauniveau für die notwendige Substitution fossiler Stromerzeugung und die erforderlichen Treibhausgasminderungen zu gewährleisten.

Für die Ausgestaltung des Ausbaupfades sind die Entwicklung des Stromverbrauchs, damit verbunden auch die Integration der PtX-Techniken in den Anwendungsbereichen und die Höhe des Ambitionsniveaus zur Treibhausgasminderung von entscheidender Bedeutung. Im Szenario GreenLate wird zwar in 2030 das THG-Reduktionsziel von 55 % erreicht (es erfolgt unter anderem ein schneller Ausbau der EE um Verzögerungen der Emissionsminderungen in anderen Bereichen zu kompensieren), zwischen 2030 und 2050 werden frühzeitige Anpassungen zur Minderung der Emissionen (z. B. Umstellung auf strombasierte Prozesse in der Industrie) verpasst und müssen verstärkt zum Ende des Zeitraumes erfolgen. Ermittelt man unter denselben Prämissen<sup>35</sup> wie für das GreenEe2 Szenario den Brutto Zubau für das GreenLate Szenario, ergibt sich das in Abbildung 5-23 dargestellte Bild (siehe hellgrün gestrichelte Linie). Der Bruttozubau würde zunächst auf 6,7 GW/a in 2030 ansteigen. Durch die in GreenLate unterstellte Verzögerung nach 2030 würde der jährliche Ausbau bis 2040 anschließend fast auf null absinken und müsste dann im Zeitraum bis 2050 nachgeholt werden. Der Zubau müsste in diesem letzten Zehnjahreszeitraum auf einen jährlichen Zubau von über 20 GW ansteigen, um das Ambitionsniveau einer vollständigen erneuerbaren Stromversorgung im Jahr 2050 noch zu erfüllen. Dies entspräche einer jährlichen Steigerung des Zubaues von mehr als 2 GW pro Jahr zwischen 2040 und 2050. Wie in einem auf fossilen Energieträgern basierenden Energiesystem ist auch bei der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Quellen ein Ersatz der Kapazitäten nach Ende der Lebensdauer erforderlich. Das bedeutet, dass die skizzierten Schwankungen sich wiederkehrend auf die Folgejahre 2050-2070 usw. auswirken würden. Der sich so ergebende

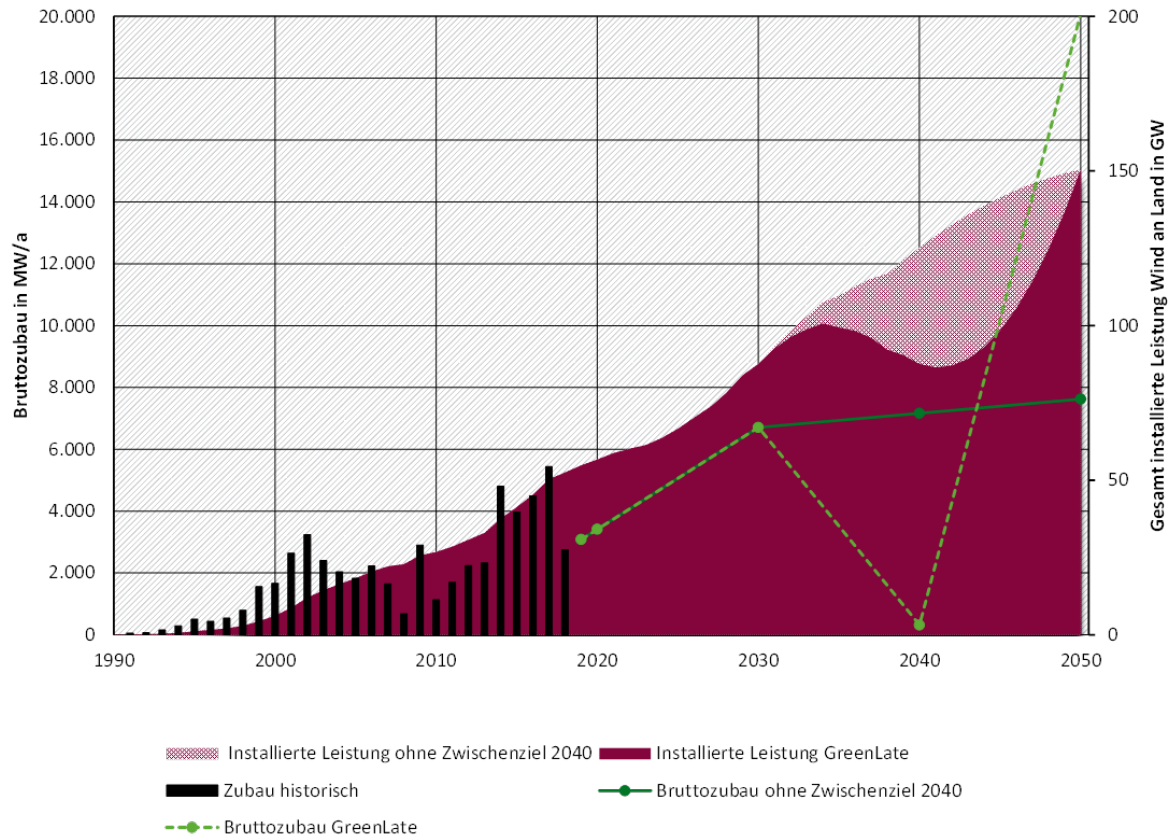
<sup>35</sup> Stetige Änderung des Bruttozubaues und Sicherstellung der Erreichung der sich aus dem Modell ergebenden Kapazität im Stützjahr.



Ausbaupfad würde alle betroffenen Akteure vor große Herausforderungen stellen und wäre so in der Praxis nicht realisierbar. Es wird deutlich, dass neben der insgesamt geringeren Treibhausgasminderung sich auch andere negative Konsequenzen aus einer verzögerten Umsetzung von Maßnahmen ergeben. Ein ambitioniertes und kontinuierliches und ganzheitliches politisches Handeln ist für alle Akteure von Vorteil.

Um auf Basis der im GreenLate-Szenario skizzierten Annahmen einen stetigen und handhabbaren Ausbaupfad zu erreichen, müsste dieser am langfristigen Kapazitätsbedarf orientiert werden. Einhergehen würde damit, dass insbesondere die kurz- und mittelfristigen Zwischenziele (2030 und 2040) und Treibhausgasminderungen des Szenarios nicht realisiert werden könnten. In Abbildung 5-23 ist im Vergleich zum Ausbaupfad des GreenLate Szenarios ein alternativer Ausbaupfad (dunkelgrün Linie, „ohne Zwischenziel 2040“) dargestellt, in welchem als Beispiel die kurzfristigeren Ziele in 2030 gewährleistet, aber das Zwischenziel im Jahr 2040 nicht berücksichtigt wird. Zusätzlich sind hier die Auswirkungen auf die Kapazitätsentwicklung dargestellt. Infolge der Ausrichtung an den langfristigen Ausbauzielen ergibt sich zwar eine stetig steigender und für alle Akteure handhabbarer Bruttozubauf (dunkelgrüne Linie) aber auch eine deutlich höhere installierte Leistung in 2040, als in GreenLate modelliert. Grundsätzlich ist es allerdings schwierig, die Ausbaupfade an einem in ferner Zukunft liegenden Ausbauziel zu orientieren, da kaum absehbar ist, wie sich Einflussfaktoren, z. B. der Stromverbrauch tatsächlich entwickeln. Diese Unsicherheiten sind mit steigender zeitlicher Entfernung größer.

**Abbildung 5-23: Vergleich des sich ergebenden Bruttozubauf und der installierten Leistung aus dem GreenLate Szenario für Windenergie an Land bei Erreichung aller Zwischenziele und bei Auslassen des Zwischenziels 2040**



Quelle: eigene Darstellung und eigene Berechnungen auf Basis von (Dittrich et al., 2020b)

Allerdings lassen sich aus den Green-Szenarien Rückschlüsse auf die kurzfristigeren Ausbaubedarfe bis 2030 ziehen. Mittelt man den notwendigen Bruttozubau zwischen den modellierten Stützjahren, wie in Tabelle 5-5 dargestellt, ergeben sich folgende durchschnittliche Bruttozubaubedarfe. Über alle Green-Szenarien<sup>36</sup> betrachtet, resultieren für die Windenergie an Land Bruttoausbauraten von über 4 GW/a zwischen 2018 bis 2030, über 5 GW/a zwischen 2030 und 2040 und bis 2050 zwischen 6 und 7 GW/a.

Um ein höheres Ambitionsniveau zur schnellen Reduktion der Treibhausgasemissionen und den internationalen Bestrebungen zur Eindämmung der globalen Erwärmung unterhalb von 1,5 °C gerecht zu werden, wäre, wie in GreenSupreme, bereits im Zeitraum bis 2030 ein Bruttozubau von ca. 5,5 GW/a notwendig. Aber auch dieser, sich aus dem GreenSupreme berechnete jährliche Zubau stellt eine konservative Abschätzung dar und muss als Untergrenze für eine Empfehlung betrachtet werden, da unter anderem die im Szenario GreenSupreme unterstellten Energieeinsparungen (siehe Tabelle 3-1) angesichts der bisher politisch beschlossenen Maßnahmen sehr ambitioniert sind. Würden die unterstellten Energieeinsparungen kurz- und mittelfristig nicht vollumfänglich erreicht, müsste bei gleichbleibenden Emissionsminderungszielen ein entsprechend höherer Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgen.

**Tabelle 5-5: Durchschnittlicher Bruttozubau an Windenergie an Land für die Umsetzung der Green-Szenarien in den jeweiligen Zeiträumen in GW pro Jahr**

	2018-2030	2030-2040	2040-2050
GreenEe1	4,4	5,8	6,5
GreenLate	4,6	3,2	11,2
GreenEe2	4,3	5,1	7,1
GreenMe	4,3	5,9	6,1
GreenLife	4,3	4,8	7,4
GreenSupreme	5,6	5,6	6,2

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.3.2.1.2 Photovoltaik

Wie bereits im Kapitel 5.2.3.2.1.1 zu den Ausbaupfaden der Windenergie an Land erläutert, hängt der Ausbaupfad entscheidend von der unterstellten Lebensdauer der Anlagen ab. Vor dem Hintergrund der in Anspruch genommenen Rohstoffe wird in allen Green-Szenarien für die Photovoltaik von einer Lebensdauer von 25 Jahren ausgegangen.<sup>37</sup> Auch bei dieser Technik gilt es große Sprünge beim jährlichen Bruttozubau zu vermeiden, langfristige Planungssicherheit zu ermöglichen und abrupte politische Richtungswechsel zu vermeiden, die wie in der nachfolgenden Box dargestellt, zu unerwünschten wirtschaftlichen Effekten führt.

<sup>36</sup> Außer GreenSupreme.

<sup>37</sup> Diese Annahme wird z. B. auch im Szenariorahmen für den Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Szenario B und C, Version 2019) getroffen. Technisch kann die Lebensdauer von PV-Anlagen 25 Jahre noch überschreiten (ggf. mit Austausch einzelner Komponenten), vielfach werden auf die Module Leistungsgarantien von 30 Jahren gegeben (50Hertz Transmission GmbH et al., 2019).

**TextBox 5-1: Boom und Zusammenbruch der deutschen Photovoltaikbranche**

Seit 2008 stieg die jährlich in Deutschland installierte PV-Leistung stark an: von knapp 2 GW (2008) auf 4,45 GW (2009) und in den Jahren 2010 bis 2012 auf ein Allzeithoch (7,5 GW; 7,9 GW; 8,16 GW) (BMWi, 2019b). Parallel dazu nahm die Zahl der Beschäftigten in der Photovoltaikbranche sehr schnell von 54.700 Personen im Jahr 2007 auf 156.700 Personen im Jahr 2011 zu. Zum Vergleich: Im Braun- und Steinkohlewirtschaft waren im Jahr 2010 etwas mehr als 100.000 Personen direkt und indirekt beschäftigt, Tendenz sinkend (Oei et al.). Die deutsche Photovoltaikbranche war bis vor wenigen Jahren breit aufgestellt und umfasste mit der Materialherstellung (z. B. Zellfertigung und Solarglas), der Modul- und Wechselrichterherstellung, dem Produktionsanlagenbau sowie Installation (v. a. Handwerk) und Wartung mehrere oder alle relevanten Stufen entlang der Wertschöpfungskette (Bruns et al., 2009).

Obleich die Systemkosten und Stromgestehungskosten von PV-Strom stetig reduziert werden konnten (Leipziger Institut für Energie GmbH, 2011), wurde die Förderung in den Jahren 2009 bis 2011 nur langsam und auf jährlicher Basis angepasst. Als Folge ergaben sich Überrenditen und ein damit einhergehender hoher Zubau an Photovoltaikanlagen.

Mit der PV-Novelle des EEG im April 2012 wurde die Förderung schließlich massiv abgesenkt und eine monatliche Basisdegression sowie ggf. weitere Absenkungen in Abhängigkeit vom vergangenen Zubau („atmender Deckel“) eingeführt. Bis Ende 2012 wurde die Vergütung für eine Kleinanlage so um ca. 40 % gegenüber dem Vorjahr abgesenkt.

In der Folge brach der Zubau zunächst auf 2,63 GW (2013) ein. Die Zahl der Branchenbeschäftigten sank auf 48.800 (2012) und weiter auf nur noch 36.000 Personen im Jahr 2016. Innerhalb von fünf Jahren gingen damit ca. 120.000 Arbeitsplätze (80 %) gegenüber 2011 verloren (O’Sullivan et al., 2018). Die Zellfertigung für den Massenmarkt ist seither fast vollständig aus Deutschland nach Asien abgewandert. Nennenswerte Weltmarktanteile halten nur noch die deutschen Wechselrichterhersteller und die Hersteller von Produktionsanlagen (Fraunhofer ISE, 2019) für die Modulherstellung. In den Jahren 2014 bis 2017 stellte sich beim Zubau eine langanhaltende Talsohle ein. In diesem Zeitraum wurden nur noch 1,5 GW installiert.

Der im EEG festgelegte Ausbaukorridor von 2,5 GW/a wurde erstmals im Jahr 2018 wieder erreicht (2,94 GW). Dieses Beispiel zeigt sowohl die Folgen abrupter politischer Richtungswechsel als auch die Länge der Zeiträume, die die Industrie benötigt, um nach einem solchen Abbruch wieder auf Kurs zu kommen. Aufgrund dieser Erfahrung liegt es nahe, für die Zukunft eine gleichmäßige und absehbare Anpassung des Ausbaus der PV anzustreben und die Förderpolitik darauf und auf die Klimaziele auszurichten. Dies schafft Planungssicherheit, die auch in Bezug auf die Qualifizierung und die Sicherung von Fachkräften für die Montage und den Betrieb von PV-Anlagen unerlässlich sind.

Für die Photovoltaik ist in Tabelle 5-6 der durchschnittliche Bruttozubau der Green-Szenarien dargestellt, um die installierten Leistungen in den jeweiligen Stützjahren (2030, 2040 und 2050) zu ermöglichen. Dabei wird unterschieden zwischen 25 Jahren Lebensdauer (wie in den Green-Szenarien modelliert) und 20 Jahren Lebensdauer (entsprechend dem aktuellen Förderzeitraum gemäß EEG).

Bei einer unterstellten Lebensdauer von 20 Jahren erfolgt in allen Green-Szenarien ein relevanter Teil des Rückbaus bereits bis 2030. Gegenüber der Betrachtung einer Lebensdauer von 25 Jahren ist für dessen Kompensation ein zusätzlicher jährlicher Zubau von mindestens 500 MW erforderlich. Zwischen 2030 und 2040 reduziert sich der Unterschied zwischen den resultierenden Bruttozubaubedarfen in allen Szenarien auf ca. 100 MW pro Jahr, da der aktuelle

Bestand bei einer Lebensdauer von 25 Jahren verstärkt in dieser Dekade ersetzt werden muss. Die angenommene kürzere Lebensdauer wirkt sich besonders stark zwischen 2040 und 2050 aus, da in diesen zehn Jahren bereits der Großteil der bis 2030 zugebauten PV-Module erneut ersetzt werden muss.

Unter den aktuellen Förderbedingungen des EEG 2017 mit 20 Jahren Förderung ergibt sich ein notwendiger jährlicher PV-Bruttozubau von ca. 3,5 GW. Erachtet man, analog zum Kapitel Windenergie, das GreenSupreme Szenario als relevant ergibt sich, je nach Lebensdauer, ein jährlicher Zubaubedarf von 4,2 bzw. 4,8 GW bis 2030.

**Tabelle 5-6: Durchschnittlicher Bruttozubau der Photovoltaik in den Green-Szenarien in Abhängigkeit der Modul-Lebensdauer in GW pro Jahr**

	Lebensdauer	2018-2030	2030-2040	2040-2050
GreenEe1	20 Jahre	3,9	6,9	9,8
	25 Jahre	3,3	6,8	8
GreenLate	20 Jahre	3,4	8	13,3
	25 Jahre	2,8	7,9	12
GreenEe2	20 Jahre	3,8	6,8	9,6
	25 Jahre	3,2	6,7	7,8
GreenMe	20 Jahre	3,4	6,7	7,2
	25 Jahre	2,8	6,6	5,8
GreenLife	20 Jahre	3,7	6,6	9,3
	25 Jahre	3,2	6,5	7,6
GreenSupreme	20 Jahre	4,8	5,3	7
	25 Jahre	4,3	5,1	4,3

Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.3.2.1.3 Zwischenfazit zu den Ausbaupfaden von Windenergie an Land und Photovoltaik

Die Green-Szenarien spannen verschiedene Wege für eine treibhausgasneutrale Energieversorgung auf und lassen entsprechend ihrer unterschiedlichen Charakteristiken verschiedene Ausbaupfade für die zentralen Techniken Windenergie an Land und Photovoltaik schlussfolgern. Grundsätzlich sind Empfehlungen für einen langfristigen Ausbau schwierig, da die tatsächliche Entwicklung entscheidender Faktoren nicht absehbar ist. Dennoch kann als Ergebnis festgehalten werden, dass **bei der Windenergie an Land ab sofort ein jährlicher Bruttozubau von mindestens 4 GW und mindestens 3,5 GW bei der Photovoltaik notwendig sind**. Dieser Ausbau stellt das Minimum dar, da die in den Green-Szenarien unterstellten Effizienzmaßnahmen als sehr ambitioniert betrachtet werden können. Wenn die Effizienzmaßnahmen in den Anwendungsbereichen nicht ausreichend ergriffen werden, ist ein höherer Ausbau der erneuerbaren Energie erforderlich, um dennoch die skizzierten Treibhausgasminderungsziele zu erreichen.

Werden die internationalen Verpflichtungen im Rahmen des Übereinkommens von Paris (ÜVP) ernst genommen und vollzieht man unter anderem den bereits eingeleiteten Ausstiegs aus der



Kohleverstromung, wie im GreenSupreme dargestellt, bis 2030, ist ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energie erforderlich, um eine sichere Stromversorgung und die Treibhausgasminderungsziele zu erreichen. **Dann sind sogar mindestens 5,5 GW/a bei Windenergie an Land und 4,8 GW/a bei Photovoltaik erforderlich.**

Um die Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Energiesystem möglichst friktionsarm zu gestalten, sind stetige Anpassungen der Ausbaupfade notwendig. Abrupte politische Kursänderungen helfen weder dem Klimaschutz noch den Akteuren (Handwerk, Hersteller, Projektierer etc.) und sollten deshalb vermieden werden. In Abhängigkeit der Wirksamkeit der Stromeinsparmaßnahmen oder der tatsächlichen Durchdringung der Sektorkopplung sind frühzeitig und fortwährend die damit verbundenen notwendigen Steigerungen der Bruttozubaubedarfe vorzunehmen. Dabei kann auch die Verlängerung von Förderdauern (entsprechend der tatsächlichen technischen Lebensdauern) in Betracht gezogen werden, da der Ersatz von rückgebauten Energieerzeugungskapazitäten eine zunehmende Rolle für den Ausbaubedarf darstellt.

#### 5.2.3.2.2 Windenergie an Land

Wie bereits dargestellt, soll die Windenergie an Land zur tragenden Säule der künftigen Energieversorgung werden. Bis 2030 wird ein Ausbau von 82 GW in GreenEe2, GreenMe und GreenLife, knapp 84 GW in GreenEe1 und 88 GW in GreenLate modellendogen ermittelt. Im Szenario GreenSupreme werden bereits 103 GW benötigt. Bis 2050 steigen jeweils die installierten Leistungen bis etwa 128 GW in allen Green-Szenarien an, außer in GreenLate, in dem mit rund 150 GW ein deutlich stärkerer Ausbau erforderlich ist. Bis 2050 basieren 52 % bis 54 % und in GreenSupreme sogar 57 % der Stromversorgung auf Windenergie an Land.

Für die rohstofflichen Auswirkungen dieses Ausbaus wird in allen Green-Szenarien vereinfachend eine Windenergieanlage mit einem elektrisch erregten Synchrongenerator im Direktantrieb unterstellt. Dieser Generatortyp weist nach (Wiesen et al., 2017) die geringsten Rohstoffbedarfe auf. Entsprechend der Szenariencharakteristik werden in den Green-Szenarien, genauer gesagt in GreenMe und GreenSupreme, die in Anspruch genommenen Materialien variiert. Konkret wird in GreenMe und GreenSupreme die Lebensdauer der Fundamente und Türme auf 40 Jahre verlängert, die Lebensdauer der Generatoren beträgt in allen Szenarien 20 Jahre. Ab 2025 erfolgt der Zubau zur Hälfte mit Hybridtürmen mit zunehmendem Anteil an Stahlrohr. Hierdurch kann insbesondere der Bedarf an Baumineralien und Stahl reduziert werden. Ab 2030 erfolgt der Zubau vollständig mit Hybridtürmen mit hohem Stahlrohranteil. Zudem wird beim Zubau ab 2030 eine Leistungssteigerung der Anlagen auf 6 MW bei geringfügiger Steigerung der Flächenleistung und entsprechender Anpassung der Rotordurchmesser erreicht. In allen anderen Szenarien werden über den gesamten Zeitraum 2,5 MW Anlagen mit einer Nabenhöhe von 150 m und einem Rotordurchmesser 115 m zugebaut.

Mit dem dargestellten Ausbaubedarf gehen verschiedenen Herausforderungen einher, die nachfolgend dargestellt werden.

##### 5.2.3.2.2.1 Herausforderungen beim Ausbau von Windenergie an Land

#### Verfügbarkeit von Fläche

In allen Green-Szenarien wurde unter Berücksichtigung von Umwelt- und Naturschutzaspekten angenommen, dass für die Windenergienutzung an Land eine Fläche in der Größenordnung von 7.800 km<sup>2</sup> zur Verfügung steht, auf welcher eine installierte Leistung von etwa 200 GW möglich wäre.

Mit Einführung der Ausschreibungsmodalitäten im Jahr 2017 ist der Ausbau von Windenergie an Land eingebrochen. Der Zubau im ersten Quartal 2019 ist mit 134,1 MW der schwächste seit

dem Jahr 2000. Hauptgrund ist die Zuschlagssituation aus 2017, bei welcher über 90 % der Zuschläge an Bürgerenergiegesellschaften ohne Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz gegangen sind (Fachagentur Wind an Land, 2019a). Hier ist eine Realisierungsfrist von vier Jahren erlaubt, wodurch der Zubau teilweise erst 2020 und 2021 erfolgen wird.

Zusätzlich gibt es einen Engpass in der Genehmigungssituation. Windenergieanlagen sind nach § 35 BauGB privilegiert und können im Außenbereich grundsätzlich errichtet werden, soweit keine öffentlichen Belange entgegenstehen. Um einen ungesteuerten Ausbau zu vermeiden, werden auf Regional- und Bauleitplanebene Flächen für die Windenergie festgelegt, so dass eine Genehmigungsfähigkeit außerhalb der festgesetzten Flächenkulisse in der Regel nicht möglich ist.

In der UBA-Studie „Flächenanalyse Windenergie an Land“ (UBA, 2019a) wurde das Potential an installierbarer Leistung für die 2017 geltenden und sich in der Aufstellung befindlichen Flächen bundesweit ermittelt. Die für die Errichtung von Windenergieanlagen ausgewiesenen Flächen umfassen 3.131 km<sup>2</sup>, d. h. 0,9 % der Landesfläche. Ohne Berücksichtigung von bereits errichteten Bestandsanlagen wären hierauf theoretisch 80,7 GW installierbar. Unter der Annahme, dass von den heute installierten Anlagen bis 2030 ein Rückbau von etwa ca. 20 GW mit Auslaufen der EEG-Förderung nach 20 Jahren erfolgt, beträgt das bis 2030 maximal mögliche Potential an neu installierbaren Anlagen auf den ausgewiesenen Flächen 55,4 GW. Das realisierbare Potential wird aufgrund von Unsicherheiten voraussichtlich erheblich darunter liegen. Zu den Unsicherheiten zählen beispielsweise, dass 34,4 GW auf Flächen entfallen, welche noch nicht final festgelegt sind, und 11 GW auf Flächen aus der Bauleitplanung, für welche keine Angaben zum Status, Alter oder zu möglichen Höhenbeschränkungen zu Grunde gelegt werden konnten. Grundlegend spielt die Nicht-Nutzbarkeit von ausgewiesenen Flächen, bspw. aus wirtschaftlichen, genehmigungs- oder privatrechtlichen Gründen, eine große Rolle. So wurden auf 23 % der Flächen, welche bis Ende 2014 ausgewiesen wurden, bisher keine Anlagen installiert.

Damit wird deutlich, dass die aktuell ausgewiesenen Flächen durch den in den Green-Szenarien skizzierten Ausbau bis 2030 vollständig ausgenutzt und darüber hinaus noch weitere Flächen benötigt würden. Auch eine Umsetzung des derzeit geplanten Ausbaus der Bundesregierung nach den Szenarien des Netzentwicklungsplanes ist auf den aktuellen Flächen kaum erreichbar. Bei einer angenommenen Laufzeit von 20 Jahren wird Szenario B gerade noch erreicht. Unter Berücksichtigung genannter Unsicherheiten ist es sehr fraglich, ob selbst die Leistung des Szenarios A 2030 erreicht werden kann (UBA, 2019a). Bis 2050 wäre für den Ausbau der Windenergie an Land in den Green-Szenarien etwa 2 % der Landesfläche Deutschlands, vorausgesetzt der tatsächlichen Nutzbarkeit, d. h. der Realisierbarkeit von Projekten, erforderlich. Um den in den verschiedenen Szenarien skizzierten Ausbau mit einem durchschnittlichen Zubauniveau von 4 -5,5 GW bis 2030 zu realisieren, bedarf es etwa der drei- bis fünffachen Menge an Genehmigungen im Vergleich zu heute. Die drastischen Entwicklungen der Ausschreibungs- und Genehmigungssituation zeigen, dass sich die Windenergie an Land aktuell in einer deutlichen Krise befindet. Um überhaupt einen weiteren Ausbau zu ermöglichen, müssen sich diese Entwicklungen zeitnah umkehren. Es bedarf dringend ausreichender Genehmigungszahlen, um das aktuelle Ausschreibungsniveau abzudecken, die aktuellen politischen Ziele im Energiesektor zu erreichen und – wie in den Green-Szenarien skizziert – den Weg zur Treibhausgasneutralität frühzeitig zu ebnen.

Gleichwohl stehen die benötigten Potentiale an sich zur Verfügung, wie die Potentialstudie im Auftrag des UBA im Jahr 2013 (UBA, 2013b) zeigt. Darin wurde unter den dort getroffenen Annahmen ein Potential für Windenergieanlagen an Land von 13,8 % der Landesfläche ermittelt.

Damit wird deutlich, dass grundlegend ausreichend Flächen zur Verfügung gestellt werden könnten.

Vor dem Hintergrund der sehr zeitintensiven Prozesse zur Ausweisung neuer Flächen ist ein frühzeitiges Handeln dringend erforderlich, um mittel- und langfristig den erforderlichen Ausbau zu gewährleisten. Impulse für ambitioniertere Ausweisungsmengen sollten zeitnah aus einem Dialog zwischen Bund und Ländern hervorgehen, um den in den Green-Szenarien skizzierten Ausbau von Windenergie an Land und damit den erforderlichen Beitrag zum Klimaschutz erreichen zu können.

### **Rückbau und Repowering**

Weiterhin sind der Rückbau und das Repowering von heutigen Anlagen zu berücksichtigen. Mit Auslaufen der EEG-Förderung für alle Anlagen, welche bis 2000 in Betrieb genommen wurden, ist ab 2021 mit erheblichen Rückbauzahlen zu rechnen (2021-2025 ca. 14 GW (UBA, 2019a). Etwa die Hälfte der Anlagen (und der Leistung) stehen außerhalb der heute planungsrechtlich festgesetzten Flächen und sind damit aus planungsrechtlicher Sicht in der Regel nicht repoweringfähig. Das bedeutet, dass ein Großteil der 2017 genutzten Fläche zukünftig nicht mehr für die Windenergienutzung zur Verfügung steht. Ein Weiterbetrieb dieser Altanlagen nach Auslaufen der Förderung hängt von ihrer Wirtschaftlichkeit ab. Aus energiepolitischer Sicht sollte der Rückbau nicht repoweringfähiger Anlagen keinesfalls angereizt werden. Wird der Ausbaupfad nach dem jetzigen EEG nicht erhöht, so ist ab 2021 mit einem Netto-Rückbau zu rechnen, d. h., dass faktisch kein Zubau mehr erfolgt, sondern die neu zugebauten Windenergieanlagen noch nicht mal den Rückbau der nicht mehr vergütungsfähigen Anlagen kompensieren.

### **Wirkungen auf den Menschen**

Negative Wirkungen von Windenergieanlagen auf den Menschen können durch Schall, Infraschall, Lichtemissionen, Schattenwurf, Eiswurf und Eisabfall oder durch die optisch bedrängende Wirkung der Anlagen auftreten. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens nach § 3 Abs. 5 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) werden die unterschiedlichen Wirkungen prognostiziert, die Einhaltung von Grenzwerten geprüft und Verminderungs- und Vermeidungsmaßnahmen festgelegt.

Bei Geräuschemissionen sind die Grenzwerte nach der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (Bundesregierung, 1998) einzuhalten. In Bezug auf die Infraschallbelastung kann nach heutigem Stand der Forschung davon ausgegangen werden, dass diese im Vergleich mit anderen (natürlichen und anthropogenen) Quellen sehr gering sind, so dass es nicht zu negativen Auswirkungen auf die Gesundheit kommt (van Kamp & van den Berg, 2018). Ab einem Abstand der dreifachen Gesamthöhe von Windenergieanlagen zur Wohnbebauung kann davon ausgegangen werden, dass keine optisch bedrängende Wirkung mehr vorliegt. Zur Vermeidung erheblicher Belästigung durch den Schattenwurf soll die astronomisch maximal mögliche Beschattungsdauer je Immissionsort maximal 30 Minuten am Tag und maximal 30 Stunden im Jahr betragen. Die tatsächliche Beschattungsdauer darf darüber hinaus acht Stunden im Jahr nicht überschreiten (Länderausschuss für Immissionsschutz, 2002).

Die für den Luftverkehr erforderlichen Kennzeichnungen<sup>38</sup> können von betroffenen Anwohnern als störend empfunden werden. Das größte Potenzial zur Emissionsminderung mit Blick auf die

---

<sup>38</sup> Windenergieanlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 100 m sind gemäß der allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen (AVV) als Hindernisse für den Luftverkehr zu kennzeichnen. Die AVV unterscheidet dabei zwischen Tages- und Nachtkennzeichnung. Die Tageskennzeichnung kann in Form farblicher Kennzeichnung (rote Streifen an Turm, Maschinenhaus und Rotorblattspitzen) oder einer Befeuerung mittels weiß blitzenden Rundstrahlfeuers auf dem Maschinenhaus

Hinderniskennzeichnung liegt im Einsatz einer bedarfsgerechten Nachtkennzeichnung. Dabei erfolgt die Befeuerung der Anlage nur dann, wenn sich ein Luftfahrzeug im Wirkungsraum der Windenergieanlage befindet. Während der restlichen Zeit wird die Kennzeichnung deaktiviert. Die rechtlichen Rahmenbedingungen hierfür sind bereits geschaffen und sollen zukünftig verpflichtend für alle Windparks werden.

Die Gefahr des Eiswurfes und die damit verbundene Ablehnung von Windenergieanlagen lassen sich heute durch verschiedene technische Ansätze vermeiden. Oftmals werden Windenergieanlagen bei tatsächlicher oder drohender Vereisung abgeschaltet, so dass ein Eiswurf infolge der Fliehkräfte des Rotors verhindert wird. Dies liegt auch im Eigeninteresse des Betreibers, da infolge des Eisansatzes am Rotorblatt verursachten Unwuchten zu einer stärkeren Belastung der Komponenten und folglich zu frühzeitigem Verschleiß führen können. Neben dem technisch beherrschbaren Risiko des Eiswurfes besteht bei stillstehenden Rotoren, wie an allen anderen hohen Bauwerken, ein Risiko durch herabfallendes Eis. Der Gefahrenbereich beschränkt sich dabei auf das unmittelbare Umfeld unterhalb des Rotors. In diesen Fällen können Passanten durch Warnschilder für die Gefahr sensibilisiert werden.

### **Wirkungen auf Natur und Landschaft**

Aufgrund der Größe der Windenergieanlagen von heute bis zu 230 m Gesamthöhe (Fachagentur Wind an Land, 2019b) sind diese weit in den Raum sichtbar und wirken sich – in Abhängigkeit von Vorbelastung und Eigenart und Schönheit des Landschaftsraumes – auf das Landschaftsbild aus. Windenergieanlagen stellen ein Risiko für insbesondere in der Umgebung vorkommende windenergiesensible Vogelarten und Fledermäuse dar. Im Rahmen der Genehmigung wird auf Grundlage umfangreicher Untersuchungen das Ausmaß des Eingriffes bestimmt und Vermeidungs-, Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen festgelegt. Grundsätzlich gilt es, negative Auswirkungen soweit möglich zu vermeiden, nicht vermeidbare Auswirkungen zu minimieren oder auszugleichen (Vgl. § 14 und 15 BNatSchG). Zur Vermeidung eines erhöhten Tötungsrisikos für windenergiesensible Vogelarten oder Fledermäuse können bspw. im Rahmen der Genehmigung Auflagen für eine Betriebsregulierung, z. B. zu bestimmten Zeiten bei bestimmten Witterungsbedingungen oder Bewirtschaftung der angrenzenden Fläche, festgesetzt werden. In Bezug auf die in Anspruch genommene, d. h. der vorherigen Nutzung entzogene Fläche, ist festzustellen, dass diese vergleichsweise gering ist.

### **Akzeptanz**

Die Notwendigkeit des Ausbaus der erneuerbaren Energien wird von der überwiegenden Mehrheit der deutschen Bevölkerung anerkannt. Nach einer Umfrage vom Juli 2017 halten 95 % der Deutschen eine stärkere Nutzung und Ausbau regenerativer Energieträger für wichtig bis außerordentlich wichtig (AEE, 2017). Die Zustimmung zu Windenergieanlagen in der Umgebung des eigenen Wohnortes ist der gleichen Umfrage zufolge mit 57 % gegenüber dieser grundsätzlichen Zustimmung deutlich geringer. Unter den Befragten, welche bereits über Erfahrung mit Windenergieanlagen in der Nachbarschaft verfügen, sprachen sich 69 % zustimmend gegenüber der Windenergienutzung aus (AEE, 2017).

In Folge der teilweise vor Ort mangelnden Akzeptanz für weitere Windenergieprojekte wurden Ende 2018 zwei Bundesratsinitiativen eingebracht (BB, NRW). In der Diskussion ist unter anderem die Einführung von Mindestabständen zur Wohnbebauung. Begründet werden entsprechende Maßnahmen oft mit einer akzeptanzfördernden Wirkung, welche durch höhere Siedlungsabstände erreicht werde. Eine vergleichende Analyse umweltpsychologischer Studien

---

erfolgen. Zur Nachtkennzeichnung werden rot blinkende Feuer auf dem Maschinenhaus und zusätzlich ab einer Gesamtanlagenhöhe von 150 m konstant leuchtende Hindernisfeuer am Turm eingesetzt ("Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen. Zuletzt geändert durch die Verwaltungsvorschrift vom 26. August 2015 (BAnz AT 01.09.2015 B4)," 2015).



hat jedoch gezeigt, dass sich kein bedeutsamer Zusammenhang zwischen Akzeptanz und Abstand nachweisen lässt (Fachagentur Wind an Land, 2015). Pauschale Siedlungsabstände werden daher als eher ungeeignet zur Förderung der Akzeptanz eingestuft. Eine pauschale Festlegung von Mindestabständen könnte dazu führen, die bereits heute sehr knappen Flächenressourcen – im Sinne von für die Windenergie planerisch festgelegten Flächen – zusätzlich zu reduzieren und so den für die Erreichung der Ausbauziele erforderlichen Windenergieausbau zu verhindern.

#### 5.2.3.2.2 Zusammenfassung

Insgesamt wird deutlich, dass die Herausforderungen für den erforderlichen Ausbau der Windenergie an Land sehr groß sind. Der sich abzeichnende Engpass tatsächlich nutzbarer Flächen für die Windenergie muss zeitnah zu ambitionierten Ausweisungszielen in Bundesländern und Regionen führen. Es bedarf gesellschaftlicher Akzeptanz, vor allem auf der lokalen Ebene, um den in den Szenarien skizzierten Ausbaupfad erreichen zu können. Des Weiteren ist es wichtig, Ursachen für unzureichende Genehmigungssituation und der daraus in den Ausschreibungen resultierenden Unterzeichnungen zu analysieren und zu beheben, um die Rahmenbedingungen zielorientiert anpassen zu können.

#### 5.2.3.2.3 Photovoltaik

Neben der Windenergie an Land wird der Ausbau der Photovoltaik, wie in Abbildung 5-16 aufgezeigt wurde, zur zweiten tragenden Säule einer erneuerbaren Stromversorgung. Folgende Annahmen für die Photovoltaik liegen den Szenarien zugrunde.

Für die Green-Szenarien wird wie bereits in (UBA, 2010), vgl. Kapitel 3.6.4 von 1.630 km<sup>2</sup> verfügbarer Dachfläche ausgegangen.<sup>39,40</sup> Bei Dachanlagen wird eine Nutzung von 30 % der geeigneten Schrägdächer und 50 % der geeigneten Flachdächer unterstellt. Diese konservative Schätzung trägt der Tatsache Rechnung, dass eine hinreichende Tragfähigkeit, Beanspruchung durch Windlasten und Abwesenheit von Beschattungen gegeben sein muss. Dieses Dachpotenzial setzt sich bei den Wohngebäuden aus 221 km<sup>2</sup> Flachdächern und aus 1.191 km<sup>2</sup> Schrägdächern zusammen. Die übrigen Dachflächen entfallen auf Schräg- und Flachdächer von Nichtwohngebäuden (UBA, 2010), vgl. Kapitel 3.6.4. Das angenommene Dachflächenpotenzial von 283 GW entspricht bei der gegebenen Fläche von 1.630 km<sup>2</sup> einer Flächenbelegung von ca. 6 m<sup>2</sup>/kWp.

Ergänzend wird für Freiflächenanlagen eine verfügbare Fläche von etwa 3.150 km<sup>2</sup> angenommen. Dies sind weniger als 1 % der bundesweiten Gesamtfläche und in keinem Bundesland mehr als 1,5 % der Landesfläche. Diese Größenordnung wurde von verschiedenen methodischen Herangehensweisen bestätigt.<sup>41</sup> Die in den Green-Szenarien getroffene Annahme zur Flächenverfügbarkeit ist jedoch nicht verknüpft mit den derzeit im Rahmen des EEG als förderungswürdig definierten Flächen.<sup>42</sup> Der Reihenabstand der Modulfelder wurde ertragsoptimiert ermittelt: Grundlage ist ein verschattungsfreier Anlagenbetrieb zur Zeitpunkt des höchsten Sonnenstandes am 21. Dezember. Das angenommene Freiflächenpotenzial von 195 GW entspricht bei der o.g. verfügbaren Fläche einer Flächeninanspruchnahme pro MW, die

---

<sup>39</sup> Es wird angenommen, dass eine Ausrichtung der PV-Dachanlagen von 90° West über Süd bis 90° Ost sinnvoll zugebaut werden kann.

<sup>40</sup> Eine Studie (BMVI, 2015) beziffert die bundesweiten Dachflächenpotenziale auf 1.045 km<sup>2</sup>.

<sup>41</sup> Vgl. etwa (BMVI, 2015), die 3.165 km<sup>2</sup> restriktionsfreie Fläche ermittelten. Dies entspricht rund 0,9 % der Landesfläche; der Flächenanteil „mit eingeschränkter Nutzbarkeit“ beträgt rund die Hälfte der Bundesfläche.

<sup>42</sup> Zu den derzeit förderfähigen Flächen zählen: 110 m-Korridore an Verkehrswegen, Konversionsflächen und sonstige bauliche Anlagen, Acker- und Grünlandflächen (in benachteiligten Gebieten) sowie Flächen die im Eigentum des Bundes oder der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben stehen. Die in den Green-Szenarien getroffenen Annahmen sind von dieser Flächenkulisse unabhängig.

bereits durch heute installierte PV-Freiflächenanlagen unterschritten wird, sodass die Annahme auch hinsichtlich der Flächenbelegung als konservativ einzuordnen ist.

Als Techniken wurden für vier Green-Szenarien außer GreenMe und GreenSupreme ausschließlich kristalline Photovoltaikmodule („Dickschicht“) unterstellt, wobei ab 2025 ein reduzierter Silberbedarf durch Substitution erreicht werden kann. Es wird ein mittlerer Wirkungsgrad neuer Module von 21 % angenommen, so dass einerseits technische Verbesserungen und andererseits die Degradation der Module im Zeitverlauf berücksichtigt wird. Die angenommene Lebensdauer der PV-Anlagen beträgt 25 Jahre. Weiterhin wird unterstellt, dass leistungsbezogen jeweils hälftig Dach- und Freiflächenanlagen installiert werden.

Vor dem Hintergrund der Szenariencharakteristik und um den Lösungsraum auch bezogen auf die Rohstoffinanspruchnahme zu erweitern, wird in den Szenarien GreenMe und GreenSupreme bewusst nicht die derzeitige Marktrealität fortgeschrieben, in der fast ausschließlich kristalline Module hergestellt werden, sondern es wird in beiden Szenarien ein besonders rohstoffeffizienter Pfad aufgezeigt. Daher werden für Dachanlagen Dünnschichtmodule mit amorphen Siliziumzellen unterstellt. Hintergrund ist deren deutlich niedrigerer Rohstoffaufwand, der hauptsächlich in Materialeinsparungen im Zuge des Aufdampfens der dünnen Halbleiterschichten sowie in Energieeinsparungen (ggü. der Herstellung kristalliner Zellen) begründet ist.<sup>43</sup> Es wird dabei unterstellt, dass der Wirkungsgrad von amorphen Silizium-modulen im Jahr 2050 demjenigen kristalliner Module entspricht (21 % Modulwirkungsgrad). Die übrigen Dünnschichttechnologien CIGS<sup>44</sup> und CdTe<sup>45</sup> werden auf Grund des Bedarfs seltener Erden nicht berücksichtigt. Der Zubau von Freiflächenanlagen erfolgt in den beiden Szenarien mit bifazialen Dickschichtmodulen, da diese bei gleichem Materialeinsatz gegenüber konventionellen kristallinen Modulen höhere Erträge aufweisen und somit Material eingespart wird. Der Zubau von Dach- und Freiflächenanlagen erfolgt ab 2025 nur noch hälftig mit den heute gängigen Techniken und ab 2030 jeweils vollständig mit Dünnschichtmodulen (Dach) bzw. bifazialen Dickschichtmodulen (Freifläche). Zusätzlich werden die Aufständereien von zugebauten Freiflächenanlagen ab 2025 mit vorgefertigten Stahlrohr-Beton-Fundamenten ausgeführt und die Lebensdauer der Aufständerei mit 50 Jahren veranschlagt. Aufgrund der deutlichen höheren Materialintensität, insbesondere der Aufständerei und Gründung, von Freiflächenanlagen wird das Verhältnis zwischen Dach- und Freiflächen in den Szenarien GreenMe und GreenSupreme verändert, so dass 75 % der Leistung als Dachanlagen und 25 % der Leistung als Freiflächenanlagen installiert werden. Hierdurch reduziert sich nicht nur die Rohstoffinanspruchnahme, sondern auch der Flächenbedarf wird der Szenariencharakteristik entsprechend deutlich reduziert, da der Zubau überwiegend auf (bereits versiegelten) Dachflächen stattfindet (siehe Abbildung 5-28 in Kapitel 5.2.3.2.8).

Im Ergebnis sind bereits 2030 zwischen 81 GW (GreenLate und GreenMe) und 104 GW in GreenSupreme an Photovoltaik ausgebaut. Letzteres entspricht etwa dem 2,3-fachen der heute installierten Leistung (Stand: Q1/2019). Bis 2050 werden die Unterschiede in den Szenarien deutlicher: so steigt die installierte PV-Leistung auf rund 131 GW in GreenSupreme und bis zu 218 GW in GreenLate an. Über alle Szenarien betrachtet, werden die Potenziale der Photovoltaik (Dach- und Freiflächenanlagen kombiniert) zu 30 % bis maximal 50 % ausgeschöpft. Unter der Maßgabe der oben aufgezeigten Potenziale bestehen sowohl bei Dach- als auch bei Freiflächenanlagen in allen Szenarien noch deutliche Spielräume. Die höchste

---

<sup>43</sup> siehe Quelle (UBA, 2019a).

<sup>44</sup> Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid.

<sup>45</sup> Cadmium-Tellurid.

Potenzialbelegung liegt mit 56 % bei den Freiflächenanlagen im Szenario GreenLate vor (entsprechend 109 GW der ermittelten Potenziale in Höhe von 195 GW).

#### 5.2.3.2.3.1 Herausforderungen beim Ausbau der Photovoltaik

##### Verfügbarkeit der Fläche

Vor allem für PV-Freiflächenanlagen bestehen Herausforderungen hinsichtlich ihres Flächenbedarfs und damit verbundener Umweltwirkungen und Akzeptanzfragen. Bei Dachanlagen, auf die in den Szenarien GreenEe, GreenE2, GreenLate und GreenLife 50 % der installierten Leistung entfällt, stellen sich diese Herausforderungen nicht.<sup>46</sup> Voraussetzung für die Errichtung von PV-Freiflächenanlagen ist ein gültiger Bebauungsplan. Im Rahmen der Planaufstellung erfolgt eine strategische Umweltprüfung einschließlich der Erstellung eines Umweltberichtes sowie die Beteiligung der Öffentlichkeit und Träger öffentlicher Belange.

Da die Globalstrahlung und somit die erzielbaren Stromerträge sich innerhalb des Bundesgebietes nicht wesentlich voneinander unterscheiden, spielt die Verfügbarkeit günstiger Flächen und ggf. die Nähe zum Netzverknüpfungspunkt die wichtigste Rolle für die Standortwahl von PV-FFA. Die getroffene Annahme zur Flächenverfügbarkeit für PV-FFA wird auf Basis weiterer Studien bestätigt. Aus dem EEG-Erfahrungsbericht (ZSW, 2019) ergibt sich, dass Ende 2018 PV-FFA auf einer Gesamtfläche 293 km<sup>2</sup> installiert waren. Davon sind mehr als 60 % Konversionsflächen und sonstige bauliche Anlagen, 26 % Ackerland (seit 2016 nur noch in benachteiligten Gebieten) und 13 % Verkehrsflächen (110 m-Seitenrandstreifen von Autobahnen und Schienenwegen), wobei letztere oftmals in der Vornutzung auch den Ackerflächen zuzuordnen waren.

In allen Flächenkategorien werden, selbst innerhalb des gegenwärtigen EEG-Rahmens<sup>47</sup>, noch hohe Flächenpotenziale gesehen. Hinsichtlich der Konversionsflächen ist mindestens eine Verdopplung der aktuell dort installierten Leistung möglich (ZSW, 2019). In den Flächenkategorien „Seitenrandstreifen“ und „Flächen im Eigentum des Bundes oder der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben“ könne in etwa das Zehnfache der aktuellen Kapazität installiert werden. Hinsichtlich der Ackerflächen ist das Potenzial infolge der Einschränkungen bzw. punktuellen Freigaben der Bundesländer bestimmt. Insgesamt seien noch zwischen 661 km<sup>2</sup> und 1.200 km<sup>2</sup> auf Basis der gegenwärtigen Flächenkulisse verfügbar (ZSW, 2019), dies entspricht mit heutiger Modultechnik einer installierte Leistung zwischen 44 GW und 80 GW. Letztere Flächenschätzung dürfte somit ausreichen, um die Zielleistung an Freiflächen-PV für das Jahr 2050 in den Szenarien GreenEe, GreenE2, GreenMe und GreenLife zu decken.

Allerdings ist nicht gesichert, dass alle Flächen der EEG-Kulisse tatsächlich im vollen Umfang genutzt werden können. Daher wird die Flächenanalyse über den geltenden EEG-Rahmen hinaus erweitert.<sup>48</sup> So wird beispielsweise in einer Studie auf Basis des EEG-Erfahrungsberichts ein erweitertes raumverträgliches Flächenpotenzial ermittelt. Durch Verdopplung des Seitenrandstreifens auf 220 m plus einer Flächenarrondierung bis maximal 500 m, durch weitere Bereitstellung von BIImA-Flächen und geringer Öffnung von Ackerflächen werden in verschiedenen Varianten bis zu 2.290 km<sup>2</sup> (entsprechend 152 GW) raumverträgliches Flächenpotenzial ermittelt (ZSW, 2019). Folglich ist – anders als bei der Windenergie – die Flächenverfügbarkeit für Freiflächen-PV selbst im Szenario mit dem höchsten Freiflächen-Zubau

<sup>46</sup> Aus diesem Grund legen z. B. Umweltverbände (NABU, 2019) aber auch das UBA (UBA, 2010) einen Schwerpunkt auf Dachanlagen. Derzeit (Stand 01/2019) sind etwa zwei Drittel der installierten Photovoltaikleistung auf Dachflächen installiert.

<sup>47</sup> Darunter fallen: 110 m-Korridore an Verkehrswegen, Konversionsflächen und sonstige bauliche Anlagen, Acker- und Grünlandflächen (in benachteiligten Gebieten) sowie Flächen die im Eigentum des Bundes oder der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben stehen.

<sup>48</sup> Vgl. etwa BMVI (BMVI, 2015), die 3.165 km<sup>2</sup> restriktionsfreie Fläche ermittelten.

von 109 GW (GreenLate) unproblematisch, zumal als flächenneutraler Ersatz noch die Dachflächen bereitstünden.

### **Wirkungen auf Natur und Landschaft**

Bei Photovoltaik-Dachanlagen sind keine signifikanten Wirkungen auf Natur und Landschaft zu erwarten, da die genutzten Flächen bereits durch das Gebäude versiegelt sind. Lediglich der optische Eindruck verändert sich.

Zu den möglichen Umweltwirkungen von Solarparks zählen vor allem die punktuelle Versiegelung (maximal 5 % der Gesamtfläche) und die Überschattung sowie Überschirmung von Flächen, welche mit dem Verlust von Lebensräumen und Veränderungen der Vegetation einhergehen kann (Herden et al., 2009; NABU, 2019; ZSW, 2014). Sofern Ackerflächen genutzt werden, entsteht unter den Modulen extensiv bewirtschaftetes Grünland, welches im Zuge der Anlagenrealisierung entsprechend umgewidmet werden sollte, um den aus naturschutzfachlicher Sicht positiven Effekt auch nach Ende der Nutzungsdauer weiterhin sicherzustellen (NABU, 2019). Die Nutzung bereits bestehenden Grünlandes für Photovoltaikanlagen wird aus naturschutzfachlicher Sicht dagegen problematisch gesehen (ZSW, 2019).

Die Zwischenräume und Randbereiche sowie die Bereiche innerhalb der Modulflächen von Solarparks werden nachweislich von verschiedenen Vogelarten genutzt. Insbesondere ehemals intensiv genutzte Ackerflächen können sich zu wertvollen avifaunistischen Lebensräumen entwickeln (ZSW, 2014). Hinsichtlich einer möglichen Veränderung des Landschaftsbildes ist festzuhalten, dass eine PV-Freiflächenanlage auf Grund ihrer geringen Höhe nur in der unmittelbaren Nachbarschaft überhaupt wahrgenommen wird (ZSW, 2014).

Auftretende Umweltwirkungen lassen sich durch Kompensationsmaßnahmen regelmäßig ausgleichen. Der NABU (NABU, 2019) empfiehlt hinsichtlich der Standortwahl zunächst die bevorzugte Nutzung von Flächen mit hoher Vorbelastung und geringer naturschutzfachlicher Bedeutung (z. B. hoher Versiegelungsgrad oder hohe Bodenverdichtung). Um einen landschaftsprägenden Charakter der PV-Anlage zu vermeiden, sollten keine exponierten Standorte auf Anhöhen gewählt werden.<sup>49</sup> Hinsichtlich der Ausgestaltung der Anlage sollte der Anteil der überdeckenden Modulfläche begrenzt werden, die Einzäunung so gestaltet sein, dass sie keine Barrierewirkung für Kleinsäuger und Amphibien darstellt, ggf. kann ein eingrenzender Heckenbewuchs vorgesehen werden (NABU, 2019; ZSW, 2014).

### **Akzeptanz**

Infolge der geringen Umweltwirkungen durch PV-Freiflächenanlagen ist auch die Akzeptanzfrage im Vergleich zur Windenergie insgesamt weniger problematisch. Die Frage stellt sich jedoch insbesondere in Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Flächenkonkurrenz (ZSW, 2019). Hintergrund ist, dass besonders in den Boomjahren der PV-Freiflächenanlagen eine Steigerung der Bodenpreise zu verzeichnen war. Dies führte zu Einschränkungen der förderfähigen Flächenkulisse im EEG besonders hinsichtlich Ackerflächen - noch heute kann mit der Flächenverpachtung für Freiflächenanlagen ein Vielfaches der Erträge aus landwirtschaftlicher Nutzung generiert werden.<sup>50</sup>

Die Notwendigkeit des Ausbaus der erneuerbaren Energien wird von der überwiegenden Mehrheit der deutschen Bevölkerung anerkannt. Nach einer Umfrage vom Juli 2017 halten 95 %

---

<sup>49</sup> Dagegen sprechen auch mögliche erhöhte Blendwirkungen, über deren Auftreten möglicherweise Gutachten angefertigt werden müssten (ZSW, 2014), welche die Kosten erhöhen.

<sup>50</sup> Dieses kostenseitige Ungleichgewicht ist einer der Hinderungsgründe für innovative Kombinationen von Landwirtschaft und Photovoltaik (sogenannte „Agrar-PV“).



der Deutschen eine stärkere Nutzung und Ausbau regenerativer Energieträger für wichtig bis außerordentlich wichtig (AEE, 2017; BMU & UBA, 2019). Die Zustimmung zu Solarparks in der eigenen Nachbarschaft ist mit 72 % immer noch sehr hoch; bei Erfahrungen mit entsprechenden Anlagen in der eigenen Nachbarschaft stieg die Zustimmung sogar auf 94 % (AEE, 2017). Diese Akzeptanz kann möglicherweise der mit der bislang begrenzten Anlagengröße von üblicherweise maximal 10 MW<sup>51</sup> (bei Anlagen ca. 0,4 km<sup>2</sup>, bei heutiger Inbetriebnahme ca. 0,15 km<sup>2</sup>) zusammenhängen. Dadurch bleiben Änderungen der Raumstruktur, die technische Prägung der Landschaft, die Barrierewirkung durch die Zaunanlagen oder Standortveränderungen durch Beschattung überschaubar. Gleiches gilt für den Umfang der notwendigen Bautätigkeit. Diese leistungsbezogene Einschränkung ergibt sich - mit Ausnahme von PV auf sonstigen baulichen Anlagen – aus dem Förderrahmen des EEG. Im Zuge der sinkenden Stromgestehungskosten wurden in jüngster Vergangenheit ungeforderte PV-Freiflächenanlagen in Betrieb genommen, die keiner Größenbegrenzung unterliegen und teilweise dreistellige Hektarzahlen für eine einzige Anlage beanspruchen können. Die aus naturschutzfachlicher Sicht besonders wertvollen Randbereiche sinken im Verhältnis zur Gesamtfläche stark ab, gleichzeitig steigt die Raumwirkung und der landschaftsprägende Charakter des Solarparks deutlich an – diese Entwicklung gilt es aufmerksam zu beobachten, auch mit dem Ziel die hohe Akzeptanz der Photovoltaik langfristig zu erhalten. Allerdings wäre es denkbar, die Größenbeschränkung im EEG von einer fixen Leistungszahl auf die beanspruchte Fläche umzustellen. So kann heute eine 20 MW-Anlage auf derselben Fläche errichtet werden, die im Jahr 2010 nur für 10 MW ausgereicht hätte.

#### 5.2.3.2.3.2 Zusammenfassung

Photovoltaik auf Dach- und Freiflächen soll neben der Windenergie die Stromversorgung in Deutschland sicherstellen. Dafür ist ein zügiger und gleichzeitig stabiler Ausbaupfad erforderlich. Die Herausforderungen hinsichtlich möglicher Umweltwirkungen scheinen überschaubar, solange sichergestellt wird, dass eine Öffnung der Flächenkulisse, sofern nötig, maßvoll geschieht und die Umwelt- und Naturschutzbelange im Blick behält. Ergänzend oder alternativ bietet sich eine noch stärkere Nutzung der Dachflächen an. Die Akzeptanz ist auch für Freiflächenanlagen sehr hoch und sollte langfristig erhalten werden.

#### 5.2.3.2.4 Windenergie auf See

Auch die Windenergie auf See spielt eine entscheidende Rolle in einem treibhausgasneutralen Energiesystem. Sie erfährt eine zunehmende Bedeutung in der nationalen Energiepolitik, da sie einen Rahmen für die Realisierung technologischer Großprojekte bietet und wegen der stetigeren und stärkeren Windverhältnisse für höhere Stromerträge bei gleicher installierter Leistung sehr gute Ausgangsvoraussetzungen bietet. Ebenso bestehen aufgrund der größeren Siedlungsferne weniger Akzeptanzprobleme.

Seit der Inbetriebnahme des ersten Windparks Alpha Ventus 2010 in der Nordsee zählen die Nord- und Ostsee 22 vollständig einspeisende Windparks (Stand: Ende 2018). Hiervon liegen 18 Parks mit einer installierten Leistung von 5,3 GW in der Nordsee sowie vier Windparks mit einer installierten Leistung von 1,1 GW in der Ostsee. Mit dem EEG 2017 und dem zeitgleich implementierten „Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See (Windenergie-auf-See-Gesetz, im Folgenden WindSeeG)“ erfolgte ein Systemwechsel bei der Förderung der Offshore-Windenergie. Das Ziel wird verfolgt, den Ausbau der Windenergie auf See kontinuierlich und kosteneffizient voranzubringen. Das Gesetz regelt die Flächenvoruntersuchung und -ausweisung, die Ausschreibungen, die Anlagengenehmigung

---

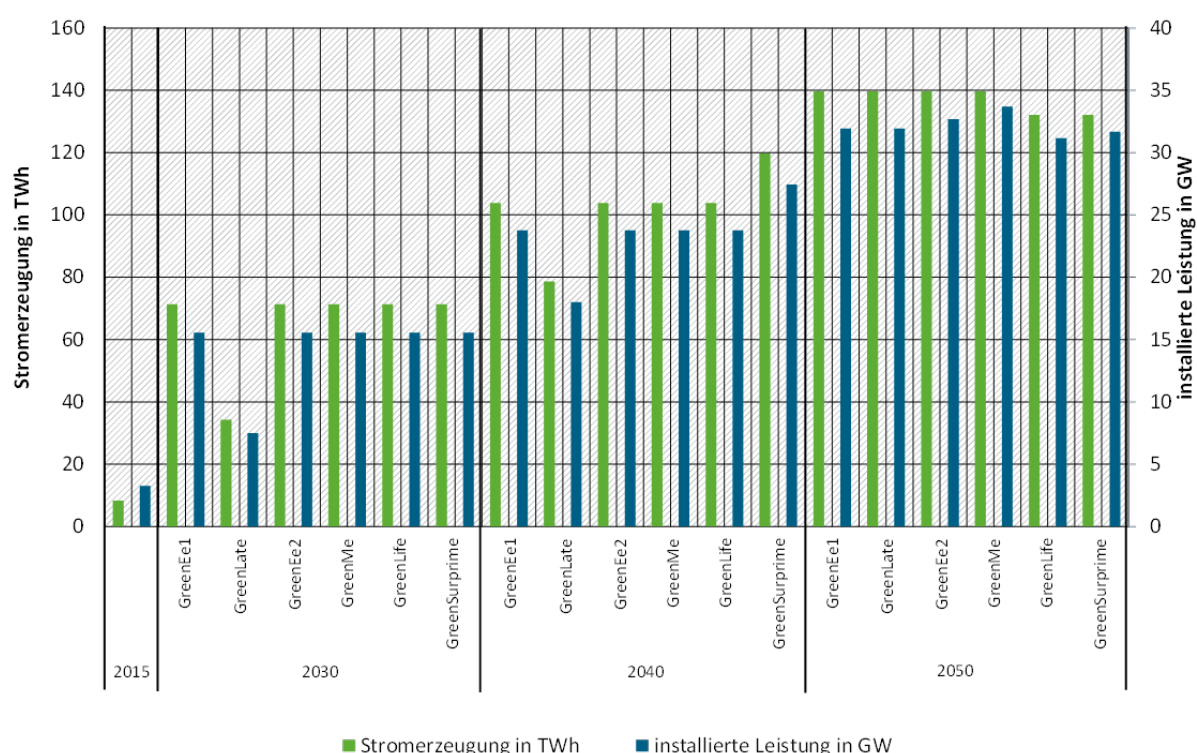
<sup>51</sup> Bei Anlagen aus dem Jahr 2010 wurden dafür ca. 0,3 km<sup>2</sup> benötigt, bei heutiger Inbetriebnahme nur noch ca. 0,15 km<sup>2</sup> (ZSW, 2019). Hintergrund ist vor allem die steigende Moduleffizienz, sodass für dieselbe Leistung weniger Fläche benötigt wird.

durch Integration von Teilen der Seeanlagenverordnung und die Abstimmung des Offshore-Ausbaus mit der Netzanbindung. Hierdurch werden zentrale Aspekte der Offshore Windenergie, wie Raumordnung, Genehmigung, Vergütung und Netzausbau aufeinander abgestimmt und in einem Gesetz miteinander verzahnt. Kernelement bildet der im WindSeeG verankerte und im Juni 2019 veröffentlichte Flächenentwicklungsplan, in dem die Vorgaben für den gestuften Planungs- und Ausschreibungsprozess festgelegt sind. Nach räumlicher und zeitlicher Ausweisung der Flächen sind im Zuge der Flächenvoruntersuchung, um die Eignung als Windparkfläche festzustellen, unter anderem die Prüfung der Betroffenheit umweltfachlicher Schutzgüter, Baugrundvoruntersuchungen, Schifffahrtskollisionsanalysen und Windgutachten erforderlich.

Die ersten Ausschreibungen für Windenergieanlagen auf See fanden für Anlagen statt, die ab 2021 in Betrieb genommen werden. Dabei wurden Projekte mit einer Leistung von 3,1 GW bezuschlagt. Es ist derzeit vorgesehen, jährlich ein Volumen von 700-900 MW auszuschreiben (Bundesnetzagentur, 2019).

Die von der Bundesregierung im EEG 2017 festgesetzten Ausbauziele für die Windenergie auf See von 6,5 GW für 2020 sind heute schon nahezu erreicht. Bis 2030 wird eine installierte Leistung von 15 GW anvisiert. Aufgrund der sich aktuell in 2019 abzeichnenden Flächenengpässe bei der Windenergie an Land, den dort bestehenden Akzeptanzproblemen sowie einem insgesamt großen klimapolitischen Handlungsbedarf, wird derzeit diskutiert, das Ausbauziel für das Jahr 2030 auf 17-20 GW anzuheben. Ein erhöhter Beitrag durch die Windenergie auf See ist zu begrüßen. Hierfür ist es zentral, den Ausbaupfad zeitnah zu konkretisieren, um die erforderlichen planerischen Voraussetzungen hinsichtlich Flächenuntersuchung und -ausweisung, Ausschreibung und Netzanbindung zu schaffen.

Die Green-Szenarien spiegeln diesen derzeit gesetzlich verankerten Ausbaupfad mit einer installierten Leistung von 15 GW bis 2030 wieder. So werden in allen Szenarien bis 2030 15,6 GW installiert. Außer im Szenario GreenLate, wo sich der Ausbau verzögert und nur 7,5 GW im Jahr 2030 installiert werden. Die Ausbaupfade setzen sich in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife fort, so das 2040 knapp 24 GW und bis 2050 rund 32 GW installiert sind. Das Szenario GreenLate holt die Verzögerungen insbesondere in der Dekade bis 2050 vollständig wieder auf. GreenSupreme steigert nach 2030 den Ausbau der Offshore-Windenergie und erreicht bereits 2040 eine installierte Leistung von rund 27 GW, wie in Abbildung 5-24 zu sehen ist. In 2050 basieren damit rund 18 % der Stromerzeugung auf Offshore-Windenergie, in GreenLate 15 %.

**Abbildung 5-24: Entwicklung der installierten Kapazitäten von Windenergie auf See und daraus resultierenden Stromerzeugung in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Seit Beginn der Windenergie auf See hat diese Branche eine erhebliche technische und ökonomische Entwicklung durchlaufen. Während die durchschnittliche Anlagenleistung der gesamten bis Ende 2018 installierten Windenergieanlagen rd. 5 MW beträgt, liegt diese bei den Neuinstallationen im Jahr 2018 bei rund 7 MW. Für den Zeitraum bis 2020 werden Installationen mit einer Turbinenleistung von rd. 8-9 MW erwartet, während sich für die Zeit ab 2025 auch der Markteintritt von Windenergieanlagen mit einer Leistung von 10-12 MW und mehr abzeichnet. In den Green-Szenarien erfolgt der Zubau mit zunehmender Leistung und Dimensionierung der Anlagen. Tabelle 5-7 zeigt die Spezifikationen für die Szenarien mit Ausnahme des GreenMe und GreenSupreme. In diesen beiden Szenarien wird davon ausgegangen, dass der Zubau ab 2030 mit Turbinen mit einer Leistung von 12 MW, einer Nabenhöhe von 120 m und einem Rotordurchmesser von 170-200 m erfolgt. Die Türme werden als Stahlrohtürme zugebaut, deren Lebensdauer in GreenMe und GreenSupreme auf 40 Jahre verlängert wird, in den weiteren Szenarien beträgt die Lebensdauer der Türme 20 Jahre. Während in den meisten Szenarien eine Schwerkraftgründung unterstellt wird, erfolgt in GreenMe und GreenSupreme eine Gründung mittels Jackets. In allen Szenarien kommen permanent erregte, synchrone Generatoren mit Getriebe zur Nutzung mit einer Lebensdauer von 20 Jahren.

**Tabelle 5-7: Parameterentwicklung der Windenergieanlagen auf See für GreenEe1, GreenLate, GreenEe2 und GreenLife**

	Leistung	Nabenhöhe	Rotordurchmesser
bis 2030	7,5 MW	124 m	188 m

	Leistung	Nabenhöhe	Rotordurchmesser
bis 2040	8 MW	127 m	194 m
bis 2050	10 MW	139 m	217 m
in 2050	12 MW	149 m	238 m

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.3.2.4.1 Herausforderungen beim Ausbau von Windenergie auf See

Wie oben dargestellt, hat sich die Offshore Windenergie aus technischer, ökonomischer und systemischer Perspektive weiterentwickelt. Dennoch bestehen für den weiteren Ausbau Herausforderungen, zu denen insbesondere die Verfügbarkeit von Flächen, die Netzanbindung und der landseitige Netzausbau der Übertragungsnetze (siehe Kapitel 5.2.5.1) sowie umwelt- und naturschutzfachliche Belange gehören. Der Ausbau der Windenergie auf See ist im Einklang mit dem Umwelt- und Naturschutz zu gestalten und die Wirkungen auf die verschiedenen Umweltschutzgüter sind zu berücksichtigen. Dies findet bereits auf Planungsebene der Raumordnung, der Flächenentwicklungsplanung sowie der Flächenvoruntersuchung im Rahmen der strategischen Umweltprüfung statt. Im Zuge der Zulassung im Planfeststellungsverfahren erfolgt noch eine Umweltverträglichkeitsprüfung.

Die „Fläche“ ist dabei auch im Meer ein sehr begehrtes Gut, der Meeresraum unterliegt zahlreichen intensiven Nutzungen, wie Fischfang, Schifffahrt, Erdöl- und Erdgasgewinnung, Kiesgewinnung, militärischen Nutzungen, Windenergieproduktion. Ebenso sind Schutzgebiete vorbehalten. Die Nord- und Ostsee bilden innerhalb Europas ein zentrales Gebiet für den Meeresnaturschutz. Die Wattenmeerküste stellt einen einmaligen Lebensraum dar und ist auch für Zugvögel ein zentraler Rastplatz im Herbst und Frühling. Windparks können im Bau und im Betrieb unterschiedliche Einflüsse auf das marine Ökosystem haben. Die eingehende oben genannte Untersuchung der Wirkungen auf die Umweltschutzgüter sowie eine räumliche und zeitliche Koordination des Ausbaus der Windparks ist daher hilfreich, um kumulative Auswirkungen auf die Meeresumwelt in bestimmten Regionen zu vermindern. Besonders von Bedeutung sind während der Errichtungsphase Beeinflussungen durch Schallemissionen, vor allem für marine Säuger wie den Schweinswal. Durch eine kontinuierliche Entwicklung und Verbesserung von Schallminderungsmaßnahmen wie Blasenschleiern wird diesen Auswirkungen jedoch mittlerweile effektiv begegnet. Für Seetaucher stellen die Windparks hingegen Störfaktoren dar. Nach Garthe (Garthe et al., 2018) wurden großräumige Meideradien mit einer Abnahme der Seetaucherverbreitung von 63 % im Nahfeld eines Offshore Windparks (bis zu 10 km) sowie einer Abnahme von 20 % außerhalb davon festgestellt. Weitere Begleitforschungen sind hier relevant. Darüber hinaus sind jedoch auch positive Effekte zu verzeichnen. So sind bspw. positive Auswirkungen auf die Fischbestände teilweise zu nennen, da innerhalb der Windparkflächen keine Fischerei stattfindet (NABU, 2019).

#### 5.2.3.2.4.2 Zusammenfassung

Die Windenergie auf See spielt für die deutsche Energiewende eine entscheidende Rolle. Zwar muss der Strom aus windenergiereichen, verbrauchsferneren Standorten für verbrauchsstärkere Standorte im Süden bereitzustellen, bietet aber mit höheren Vollaststunden und eine höheren Akzeptanz entscheidende Vorteile. In den letzten Jahren hat sie eine enorme technische und ökonomische Entwicklung vollzogen. Um die Potenziale der Offshore



Windenergie ideal ausschöpfen zu können ist es erforderlich, die planungsrechtlichen Voraussetzungen zu verstetigen.

#### 5.2.3.2.5 Wasserkraft

Der heutige Anteil der Energieerzeugung aus Wasserkraft am Bruttostromverbrauch in Deutschland pendelt um 3,5 %. Je nach Witterung und Abflussführung der Flüsse schwankt die jährliche Stromgewinnung aus Wasserkraft um etwa 10 bis 15 %. Hohe Stromerträge waren zu Beginn der 2000er-Jahre mit über 22.000 GWh/a möglich, während die Stromgewinnung in Trockenjahren auf unter 18.000 GWh sinken kann. Da das technisch-ökologische Potenzial zur energetischen Nutzung der Wasserkraft in Deutschland nahezu ausgeschöpft ist, wurde in allen Green-Szenarien das Potential auf eine mögliche installierte Leistung von 5,2 GW bzw. einem Energieertrag von 24 TWh/a festgelegt. Die Annahmen basieren auf den Ergebnisse der DLR-Studie (DLR et al., 2004), die bis zum Jahr 2050 eine Erhöhung des technischen Potenzials auf 5,4 GW (25 TWh/a) ermittelte. Der noch zu erzielende Leistungszuwachs von fünf TWh pro Jahr ist in erster Linie durch die Optimierung und Modernisierung oder die Reaktivierung von Wasserkraftanlagen an bereits bestehenden Stauhaltungen möglich. Dabei entfallen mindestens 80 % der technischen Zubaumöglichkeiten auf große Gewässer und große Wasserkraftanlagen. Das geringe zusätzliche Potenzial von 20 % rührt aus der langen Tradition der Wasserkraftnutzung in Deutschland und zeigt, dass die vorhandenen Möglichkeiten im Wesentlichen genutzt und erschlossen wurden.

In den Green-Szenarien wird unterstellt, dass diese Modernisierung ausgehend vom derzeit im langjährigen Mittel von ca. 20,3 TWh (AGEE-Stat, 2017) bereits bis zum Jahr 2030 umgesetzt wird und anschließend konstant bleibt. Dabei wurde die auf den natürlichen Zuflüssen des realen hydrologischen Wetterjahres 2011 basierende Stromerzeugung in stündlicher zeitlicher Auflösung berücksichtigt und auf den Zielenergieertrag skaliert. Ergebnis ist, dass in allen Green-Szenarien die Wasserkraft eine untergeordnete Rolle bei der Stromerzeugung im gesamten Untersuchungszeitraum innehat und 2050 etwa 3,5 % zur Stromversorgung beiträgt. Im Szenario GreenLate sind es vor dem Hintergrund der höheren Strombedarfe nicht einmal 3 % und verbleibt damit auf dem heutigen Niveau.

Beim Neubau großer Wasserkraftprojekte sind vielfältige soziale und sozioökonomische Kriterien zu berücksichtigen, die in Deutschland infolge des hohen Erschließungsgrads der Wasserkraftnutzung nicht mehr relevant sind. Beeinträchtigungen treten vornehmlich in der Bauphase (z. B. Lärm, Flächenverbrauch von Pumpspeicherkraftwerken, Gefahr des Austritts wassergefährdender Stoffe) und in seltenen Fällen beim Betrieb (z. B. Lärmemissionen) von Wasserkraftanlagen auf. Von Bedeutung sind die Auswirkungen der Wasserkraftnutzung für das Erreichen der Umweltziele beim Gewässer- oder Naturschutz und u.U. für die Fischerei. Mit der Erschließung eines Gewässers für die energetischen Nutzung sind verschiedene Eingriffe in das Gewässer und die Landschaft verbunden, die Auswirkungen auf die abiotischen Umweltbedingungen haben und in der Folge die biologische, physikalische und chemische Funktionsfähigkeit der betroffenen Fließgewässer- und Auenökosysteme beeinträchtigen können. Als besonders wesentlich werden die Behinderung der Durchgängigkeit der Fließgewässer für Organismen und Feststoffe, die Schädigung von Organismen durch den Turbinenbetrieb und am Kraftwerksrechen sowie Lebensraumveränderung infolge des Gewässeraufstaus und durch ungenügende Mindestwasserabflüsse in den Ausleitungsstrecken erachtet. Einige dieser Umweltwirkungen lassen sich durch geeignete Maßnahmen zur Herstellung der Durchgängigkeit (Fischauf- und Fischabstieg), zum Fischschutz, zur Mindestwasserführung oder zur hydromorphologischen Verbesserung minimieren. Allerdings stößt die Umsetzung dieser im Wasserhaushaltsgesetz vorgesehenen Maßnahmen zur Verringerung der Umweltwirkung an ihre wirtschaftlichen Grenzen, je geringer die

Stromproduktion der Wasserkraftanlage ausfällt. Dies kann zu Konflikten und interessenabhängig zu Problemen bei der Akzeptanz der Wasserkraftnutzung führen.

#### 5.2.3.2.6 Tiefe Geothermie

Die geothermische Energieerzeugung unterliegt der regionalen Verteilung entsprechend der vorhandenen Quellen. Prinzipiell wird dabei in der tiefen Geothermie zwischen hydrogeothermalen und petrothermalen Ressourcen unterschieden (Agemar, Alten, et al., 2014; Schulz et al., 2013). Eine weitere geothermische Nutzung stellen tiefe Erdwärmesonden dar, die weitgehend standortunabhängig sind. Für die Green-Szenarien werden die Potentiale der tiefen Geothermie durch exogene Vorgaben, beispielsweise zum Anteil der Fernwärmeversorgung und die Berücksichtigung der regionalen Verteilung von Wärmequellen mit hohem Temperaturniveau und -senken mit hoher Wärmebedarfsdichte, lediglich in geringer Höhe berücksichtigt. Die konkret angenommenen Werte sind zum Überblick in Tabelle 5-8 angegeben (Dittrich et al., 2020a). Es wird in allen Szenarien von einer Anlagenlebensdauer von 30 Jahren und einer „Lebensdauer“ der Bohrung von 100 Jahren ausgegangen. Pro Anlage werden zwei Bohrungen ausgeführt (Dubleiten-Bohrung).

Hydrothermale Systeme nutzen natürliche heiße Tiefenwässer, Sonden und petrothermale Systeme nutzen hingegen die Wärme, die im Gestein gespeichert ist. Für letzteren Typ sind technische Eingriffe im Untergrund, sogenannte Stimulationen, erforderlich, damit eine ausreichende Zirkulation möglich wird. Hydro- und petrothermale Systeme arbeiten zur Energieerzeugung nach demselben Grundprinzip: Mittels Bohrungen wird Wasser als Wärmeträger zwischen Oberfläche und Untergrund zirkuliert. In der Praxis ist eine klare Unterscheidung zwischen den beiden Erschließungsarten häufig schwierig, zwischen ihnen besteht ein gradueller Übergang, da auch in hydrothermalen Vorzugsgebieten zur Erhöhung der Zuflüsse Stimulationen notwendig werden können. Gegenüber der Gesamtanzahl an Geothermieprojekten in Deutschland ist die Anzahl der Projekte mit hydraulischen Stimulationsmaßnahmen jedoch gering, tiefe Erdwärmesonden sind ebenfalls noch selten anzutreffen. Auch in naher Zukunft wird die hydrothermale Geothermie gegenüber der petrothermalen dominieren. Um allerdings Geothermie auch in Regionen ohne ausreichende Thermalwasservorkommen nutzen zu können, ist die Weiterentwicklung der derzeit angewandten Techniken erforderlich (A. Bertram & Plenefisch, 2017).

Die geförderte Wärme kann direkt, beispielsweise zu Heizzwecken, oder zur Stromerzeugung verwendet werden. Gerade bei der Wärmeversorgung, für die keine Konversionsverluste zu berücksichtigen sind, resultiert ein sehr hoher Treibhausgasminderungseffekt. Daneben ergeben sich insgesamt weitere positive Umwelteffekte, wie der geringe Ausstoß von Luftschadstoffen. Im bestimmungsgemäßen Betrieb hydrothermalen Systeme sind keine umweltschädlichen Wirkungen zu erwarten. Im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb können reversible Wirkungen auftreten, die nur lokal relevant und technisch beherrschbar sind. Gesetzliche Regelungen und technische Richtlinien gewährleisten einen sicheren Schutz von Mensch und Umwelt sowie sonstiger Schutzgüter am Standort, darüber hinaus zeichnen sie durch eine geringe Flächenneuanspruchnahme (Lohse & Schuberth, 2019) und einen geringen Rohstoffverbrauch aus. Die vorstehenden Aussagen treffen auch für petrothermale Systeme zu. Hier sind zusätzlich lediglich durch Stimulationen bzw. umfangreichere Stimulationen verursachte Umweltwirkungen zu berücksichtigen, die jedoch ebenfalls bei Anwendung der geltenden Regeln beherrschbar sind (A. Bertram & Plenefisch, 2017). Beim Einpressen von Wasser in den Untergrund kann es in seltenen Fällen zu spürbaren Erschütterungen kommen. Auf derart induzierte Seismizität kann, im Gegensatz zu natürlichen Erdbeben, durch Regulierung des Wasserdrucks eingewirkt werden. Dafür ist ein seismologisches Monitoring notwendig, das mittlerweile Standard ist. Dieses überwacht seismische Ereignisse, erlaubt deren Ortung und ein

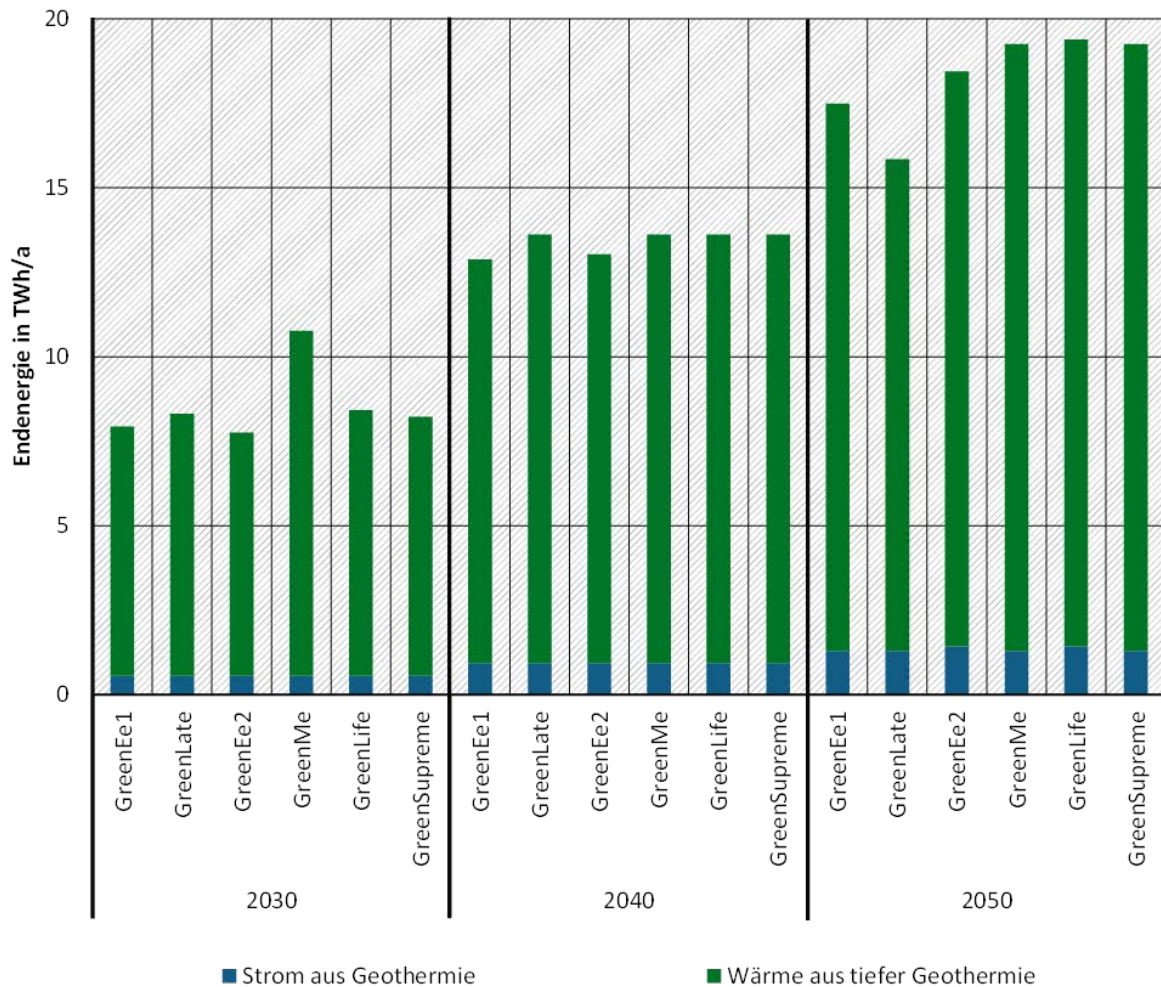
schnelles Eingreifen. Generell gilt: Die maximale Stärke von induzierten seismischen Ereignissen ist in der Geothermie deutlich niedriger als bei vielen weiteren Bergbauaktivitäten. Die Risiken sind bei Beachtung der in der Genehmigung festgelegten Vorsichtsmaßnahmen weder wahrscheinlich noch schwerwiegend (UBA, 2015d).

**Tabelle 5-8: Annahmen zur tiefen Geothermie in den Green-Szenarien**

	Potential Nettostromerzeugung	Potential Wärmeerzeugung
KWK-Anlagen	max. 2,7 TWh/a	max. 13,6 TWh/a
Heizwerke		max. 6,8 TWh/a
Summe	max. 2,7 TWh/a	max. 20,5 TWh/a

Quelle: (Dittrich et al., 2020a)

Wie in Abbildung 5-25 erkenntlich, leistet die tiefe Geothermie in allen Green-Szenarien mit maximal etwa 20 TWh/a einen entsprechend geringen Beitrag zur gesamten Energieversorgung, der das angenommene Potential nicht ganz ausschöpft. Insbesondere in der Stromversorgung ist der Beitrag mit höchstens 1,5 TWh/a sehr gering. Im Vergleich zur heutigen Stromerzeugung (2017) mit 0,16 TWh/a, welche im Wesentlichen mit 6 Anlagen erzeugt werden (Agemar, Weber, et al., 2014; UBA, 2019r), ergibt sich eine Verzehnfachung. In der Wärmeversorgung, genauer gesagt, in der leistungsgebundenen Wärmeversorgung, nimmt die tiefe Geothermie eine größere Rolle ein. Auch hier ergibt sich eine Steigerung um eine Größenordnung gegenüber dem heutigen Wert (Endenergieverbrauch Wärme 2017: 1,2 TWh (UBA, 2019r), darin mit Anlagen der tiefen Geothermie produzierte Fernwärme 0,9 TWh/a) (Agemar, Weber, et al., 2014). Weitere, wesentlichere Beträge, gerade zur Versorgung von Gebäuden, liefert die oberflächennahe Geothermie siehe dazu Kapitel 5.3.4.

**Abbildung 5-25: Entwicklung des Beitrages der tiefen Geothermie zur Endenergieversorgung in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die tiefe Geothermie befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium, der Ausbau unterliegt gegenwärtig, ähnlich anderen erneuerbaren Erzeugungstechniken im Wärmemarkt etlichen Hemmnissen. Akzeptanzprobleme, die es punktuell vereinzelt gerade bei Anlagen zur Stromerzeugung gibt, werden sich bei einer Erhöhung der Bekanntheit der Geothermie insgesamt und durch Wahrung größtmöglicher Transparenz bei der Umsetzung der einzelnen Geothermieprojekte verringern.

#### 5.2.3.2.7 Biomasse

Im Jahr 2018 wurden 43,3 TWh Strom, 132 TWh Wärme und 31,6 TWh Kraftstoff aus Biomasse (BMWi, 2019b) erzeugt. Ein großer Teil davon stammt aus Anbaubiomasse, zu deren Produktion 2018 2,2 Mio. ha Ackerfläche benötigt wurden. Die damit verbundenen Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen und negative Auswirkungen auf Wasser, Boden, Biodiversität und Naturschutz werden als nicht vertretbar erachtet (UBA, 2013a), so dass in allen Green-Szenarien die Nutzung von Biomasse, die zum alleinigen Zweck der energetischen Nutzung angebaut wird, sinkt und nach 2030 nicht mehr stattfindet. Bereits in (UBA, 2014c) konnte gezeigt werden, dass die regenerative Energieversorgung auch ohne Anbaubiomasse sichergestellt werden kann.

Auch die energetische Nutzung von Waldrestholz ist in allen Green-Szenarien stark rückläufig und findet ab 2050 nicht mehr statt. Die Basis für die mögliche Holzentnahme aus heimischen



Wäldern bildet das Naturschutzpräferenz-Szenario der WEHAM Szenarienfamilie (vgl. (Oehmichen et al., 2018)). Nicht benötigtes Holz verbleibt in allen Green-Szenarien zur Steigerung der Kohlenstoffsенке und der Biodiversität sowie aufgrund anderer umwelt- und naturschutzfachlicher Vorteile im Wald. Dies führt zu einer zusätzlichen Treibhausgasreduktion, die in den Green-Szenarien im LULUCF Bereich nicht berücksichtigt wurde, jedoch in Kapitel 5.7 näher beschrieben wird.

Ebenfalls bereits in „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c) wurde davon ausgegangen, dass vor allem solche biogene Abfall- und Reststoffe energetisch genutzt werden, durch deren Nutzung Klimavorteile entstehen. Dazu zählt insbesondere Gülle, da bei der Vergärung Treibhausgasemissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung reduziert werden können. Um diese technische Emissionsminderungsmaßnahme in der Landwirtschaft optimal zu nutzen, wird in allen Green-Szenarien davon ausgegangen, dass die Vergärungsrate deutlich steigt und bis 2050 die gesamten erfassbaren Mengen an Gülle und Mist in Biogasanlagen genutzt werden (vgl. Kapitel 5.7). Durch die unterschiedlichen angenommenen Tierzahlen und Haltungsformen in den Green-Szenarien fallen verschiedene Mengen an Gülle und Mist an und werden entsprechend berücksichtigt. In GreenLate sind in 2050 die errechneten Mengen aus Gülle und Mist, die anfallen und in die Vergärung gehen, fast doppelt so hoch wie in GreenSupreme. Auch wenn die vollständige Vergärung der erfassbaren Gülle aus heutiger Sicht als äußerst ambitioniert anzusehen ist, so kann man doch bereits jetzt eine verstärkte Akzeptanz für diese technische THG-Minderungsmaßnahme in der Landwirtschaft beobachten (BMEL, 2019a). Anreize dafür setzt zum Beispiel der mit 45 g CO<sub>2</sub>Äq/MJ Gülle bzw. Mist relativ hohe „Gülle-Bonus“ bei der Berechnung der THG-Minderung gemäß Neufassung der Europäischen Erneuerbaren Energien Richtlinie (EP & Rat der Europäischen Union, 2018a). Eine aktuelle Studie zeigt weitere Möglichkeiten auf, Anreize zu setzen, mit denen es realistisch erscheint, in den nächsten Jahren 60 % der anfallenden Gülle in Biogasanlagen in eine sinnvolle und klimaschonende Nutzung zu bringen (Scholwin et al., 2018).

Werden Bioabfälle erst vergoren und im Anschluss kompostiert, bleiben die Nährstoffe für die Kreislaufführung erhalten. Somit entsteht durch die Nutzung der Bioabfälle zur Biogasproduktion keine Nutzungskonkurrenz und beim Einsatz des Biogases können THG-Emissionen reduziert werden. Kommt es infolge der Vorschaltung einer Vergärungsstufe zu einer Aufrüstung der Technik inkl. Einhausung, können zudem THG-Emissionen der Biogut-Behandlung früher als durch den sonstigen technischen Erneuerungszyklus reduziert werden. Da jedoch gemäß der getroffenen Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung und verändertem Konsumverhalten in den Green-Szenarien insgesamt weniger Abfälle anfallen, der Anteil der getrennt erfassten und durch Vergärungsanlagen behandelten Bioabfälle jedoch steigt (vgl. Kapitel 5.6), wird für alle Green-Szenarien vereinfachend angenommen, dass die Menge der Biogasproduktion aus Bio- und Grüngut in allen Green-Szenarien und über die Jahre konstant bleibt. Auch der Anfall von Klärgas wird über die Szenarien und Jahre hinweg als konstant angenommen, siehe Kapitel 5.6.3.

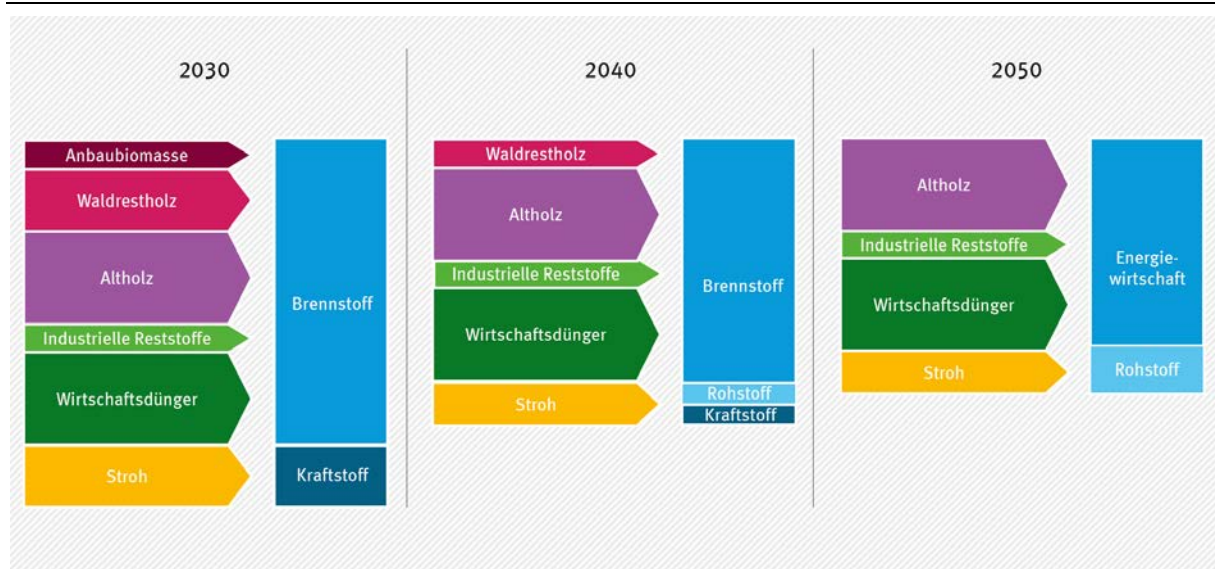
Als weitere bedeutende, biogene Abfall- und Reststoffströme wurden in den Green-Szenarien Stroh und Altholz berücksichtigt. Hier wurde angenommen, dass ausgehend von einer aktuell sehr geringen energetischen Nutzung von Stroh die genutzte Menge bis 2030 auf 9 Mio. t/a und bis 2050 auf 10 Mio. t/a steigt. Vereinfachend wurde in Bezug auf die genutzten Strohmenge nicht zwischen den Szenarien unterschieden, obwohl es durch z. B. unterschiedliche Fruchtartenanteile, Ertragssteigerungen, Anteil des Ökolandbaus oder stärkere strohgebundene Tierhaltung zu Abweichungen im Strohpotenzial kommen könnte. Da trotz langjähriger Forschung nicht abschließend geklärt ist, wie sich die Strohentnahme auf die Bodenbiodiversität auswirkt, verbleiben bei diesem Potenzial Unsicherheiten, auch wenn in allen Green-Szenarien

bereits Sicherheitsabschläge im Vergleich zu früheren Potenzialstudien (UBA, Veröffentlichung in Planung-c) angesetzt wurden. Die Altholz-Potenziale hängen letztlich von der Menge stofflich genutzten Holzes, der Art der Kaskadennutzung, der Schadstoffbelastung des Altholzes und der Nutzungsdauer der Produkte ab. In allen Green-Szenarien wird Holz vorrangig zu langlebigen Holzprodukten, insbesondere im Baubereich, verarbeitet (vgl. auch Kapitel 5.3.3). Vereinfachend wird angenommen, dass die Effekte eines höheren, zeitlich unterschiedlichen Altholzaufkommens und einer stärkeren stofflichen Altholznutzung in den Szenarien sich so ausgleichen, dass das Altholzaufkommen zur energetischen Nutzung in allen Szenarien bei gut 8 Mio. t/a konstant bleibt.

Auch wenn andere biogene Abfall- und Reststoffe in einigen Bereichen durchaus Anwendung finden (z. B. Altöle / Fette in der Biokraftstoffherstellung), stellen sie deutlich kleinere Stoffströme (UBA, Veröffentlichung in Planung-c) dar und wurden in den Green-Szenarien vernachlässigt. Industrielle Reststoffströme (z. B. Schwarzlaugenutzung bei der Papierherstellung) werden in den Green-Szenarien bei den jeweiligen Industrieprozessen berücksichtigt und werden deshalb in diesem Kapitel nicht explizit als erneuerbarer Energieträger aufgeführt. Insgesamt stellen die Annahmen der für die energetische Nutzung verfügbaren Biomasse konservative Schätzungen dar. Somit werden diverse Nutzungskonkurrenzen (u. a. um Anbaufläche und Rohstoffe für die stoffliche Nutzung) minimiert. Gleichzeitig kann erneut gezeigt werden, dass die erneuerbare Energieversorgung auch ohne einen großen Beitrag der Biomassenutzung möglich ist.

Biomasse trägt, wie in Abbildung 5-27 zu sehen ist, in den Green-Szenarien zwischen knapp 90 TWh in 2030 und rund 60 TWh in 2050 zur gesamten Energieversorgung (inkl. Rohstoffversorgung) bei und nimmt damit in allen Szenarien eine untergeordnete Rolle ein. Die prinzipielle Nutzung von Biomasse in der Energieversorgung ist qualitativ in Abbildung 5-26 zu sehen.

**Abbildung 5-26: qualitative Darstellung der Nutzung von Biomasse zur Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung**



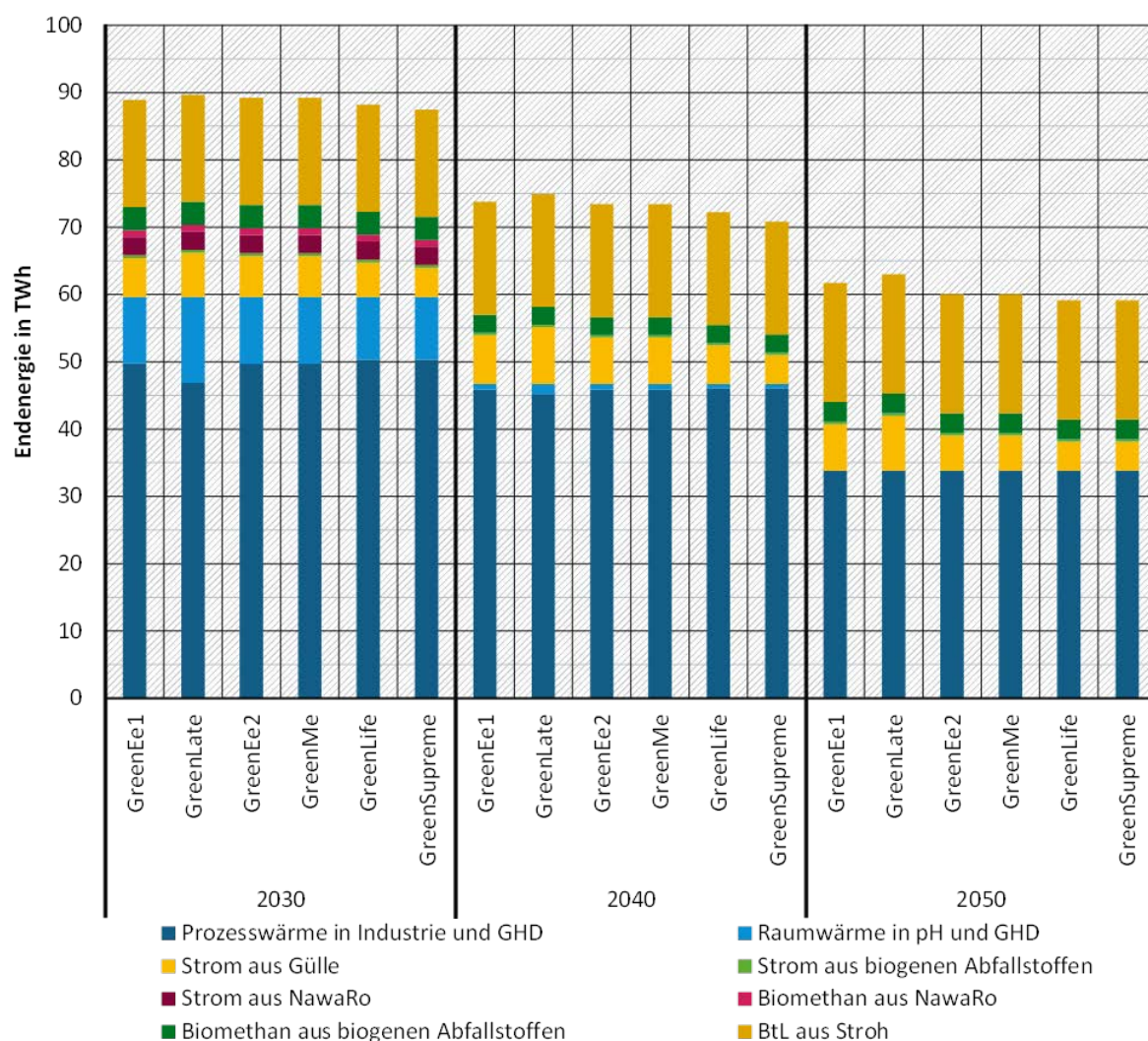
Quelle: (UBA, 2019e)

Grundsätzlich sollte die für die energetische Nutzung verfügbare Biomasse immer dort eingesetzt werden, wo sie für das Energiesystem den größten Nutzen hat, wenn dabei keine negativen Umweltwirkungen entstehen oder, wie bei der Güllevergärung, sogar zusätzlich zur Energiebereitstellung positive Effekte zu erwarten sind. Es wurde in den Green-Szenarien

unterstellt, dass Biogut, Grüngut und Gülle in Biogasanlagen eingesetzt werden. In allen Szenarien wurde für den gesamten Zeitraum bis 2050 angenommen, dass Biogas aus Gülle aufgrund der eher kleinen landwirtschaftlichen Biogasanlagen vor Ort zur Stromproduktion eingesetzt wird. Abfallvergärungsanlagen sind in der Regel deutlich größer, so dass die Aufbereitung zu Biomethan viel naheliegender ist. Deshalb wurde in allen Szenarien für den gesamten Zeitraum bis 2050 angenommen, dass 70 % des aus Bio- und Grüngut entstehenden Biogases zu Biomethan aufbereitet und die restlichen 30 % zur Stromproduktion genutzt wird. Insgesamt werden 2050 durch das produzierte Biogas zwischen 4,7 und 8,6 TWh Strom und 2,9 TWh Biomethan bereitgestellt, siehe auch Abbildung 5-27.

Die zur Verfügung stehenden Holzbiomassen (Waldrestholz, Altholz) werden in allen Green-Szenarien für die Wärmeversorgung der Industrie, der privaten Haushalte und des GHD-Sektors genutzt. Die Verteilung ist jedoch je nach Szenario unterschiedlich. In GreenLate erfolgt der Ausstieg aus der dezentralen Holzbiomassenutzung langsamer als in den anderen Green-Szenarien, so dass in GreenLate 2030 noch etwa 3 TWh und 2040 0,5 TWh in privaten Haushalten und GHD zum Einsatz kommen. In 2050 werden in allen Szenarien die komplette Waldrest- und Altholzpotezenziale in der Industrie eingesetzt, dadurch können dort 34 TWh Wärme auf einem Temperaturniveau bis 500 °C bereitgestellt werden, siehe Abbildung 5-27. Auch Bio-SNG-Produktion wäre möglich, ist aber bisher nicht etabliert und wird in den Szenarien nicht berücksichtigt.

Stroh wird in den Green-Szenarien komplett zur Produktion von Ethanol genutzt, was theoretisch für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden kann. In allen Green-Szenarien wird angenommen, dass das Ethanol 2030 noch komplett als Kraftstoff, 2040 bereits zu 50 % und 2050 komplett als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt wird, siehe Abbildung 5-26. Damit fließen 2030 16 TWh und 2040 8,4 TWh Stroh-basiertes Ethanol (BtL aus Stroh) in Verkehrsanwendungen, siehe Abbildung 5-27.

**Abbildung 5-27: Entwicklung der genutzten Endenergie und der Verwendung biogener Quellen in den Green-Szenarien (ohne Klärgas und industrielle Ströme)**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.3.2.7.1 Herausforderungen bei der Umsetzung der Green-Szenarien

##### Fläche

Die Annahme in den Green-Szenarien, dass nach 2030 keine energetische Nutzung von Anbaubiomasse mehr stattfindet, trägt dem damit verbundenen enormen Flächenbedarf und den negativen Umweltauswirkungen Rechnung. Aktuell werden für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo) rund 20 % der Ackerfläche (FNR, 2019; Statistisches Bundesamt, 2018d) in Deutschland genutzt. Zusätzlich werden Biobrenn- und v.a. -kraftstoffe importiert, für deren Produktion in den Herkunftsländern weitere Flächen benötigt werden. Bei Biokraftstoffen aus NawaRo lag die Importquote 2017 bei ca. 75 % (errechnet aus Angaben im Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2017 (BMEL, 2018b).

Egal ob inländische oder Flächen in anderen Ländern für die Produktion von NawaRo zur Energiebereitstellung genutzt werden, der Druck auf Landflächen und andere natürliche Ressourcen steigt dadurch weltweit. Es besteht eine Konkurrenz der energetischen Nutzung von Biomasse zum Ernährungssektor und zur zunehmenden stofflichen Nutzung. Im Positionspapier „Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen“ (UBA, 2013a) wird ausführlich dargelegt, warum in der Energieversorgung langfristig auf Anbaubiomasse,



inkl. Rohholz, verzichtet werden sollte. Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Flächen und des hohen Bedarfs an erneuerbarem Strom und Brenn- und Kraftstoffen sind die Flächeneffizienz und letztlich die THG-Emissionen pro Energieeinheit und Fläche wichtige Kriterien. Anbaubiomasse schneidet hier im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien sehr schlecht ab, Wind- und Solarenergie haben eine 5-50-fach höhere Flächeneffizienz als Bioenergie (DLR et al., 2012).

Seit der Streichung des NawaRo-Bonus im EEG 2012 stagniert der Anbau von Mais (FNR, 2019) für die Biogasproduktion weitgehend. Der Anbau von Raps (FNR, 2019) in Deutschland für die Biokraftstoffproduktion sinkt zwar seit der Einführung der THG-Quote 2015, der Import von Palmöl (BMEL, 2018b) für diesen Zweck steigt seitdem jedoch wieder an. Auch wenn die Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen für die Produktion von Biokraftstoffen (BMEL, 2018b) seit einigen Jahren zunimmt, stellt immer noch Anbaubiomasse den überwiegenden Anteil der in Deutschland energetisch genutzten Biomasse (z. B. rund 70 % der Biokraftstoffe (BMEL, 2018b) und 75 % des Biogas (UBA, Veröffentlichung in Planung-b) in 2017). Es ist also weiterhin von einer großen Flächennutzung in Deutschland und durch den Import von Biomasse und Biokraftstoffen auch in anderen Ländern für die energetische Biomassenutzung in Deutschland ausgehen. Würde die energetische Nutzung von NawaRo wie in den Green-Szenarien reduziert werden, stünden mehr Ackerflächen für die Extensivierung der Landwirtschaft und die Wiedervernässung von Moorflächen zur Verfügung, was der THG-Emissionsreduktion im Landwirtschaftssektor zu Gute kommen würde. Weitere Optionen zur Nutzung frei werdender Flächen werden in TextBox 5-16 diskutiert.

### **Umweltwirkungen**

Beim Anbau von NawaRo sind je nach Kultur diverse negative Umweltwirkungen zu berücksichtigen. So stellen das erhöhte Erosionsrisiko beim Maisanbau oder die häufig hohen Stickstoffüberschüsse und Pflanzenschutzzeinsätze beim Rapsanbau zum Beispiel Gefahren für die Gewässerqualität dar. Die meist intensiv bewirtschafteten Monokulturen können zudem die Biodiversität negativ beeinflussen. Besonders gravierend sind die Umweltauswirkungen, wenn für den Anbau von NawaRo eine Landnutzungsänderung, wie zum Beispiel Grünlandumbruch oder die Rodung von Regenwald für Palmölplantagen stattfindet. Auch indirekte Landnutzungsänderungen sind hier zu berücksichtigen, also Landnutzungsänderungen die infolge der Verdrängung der bisherigen Nutzung der Fläche, die für den NawaRo-Anbau genutzt werden soll, an anderer Stelle entstehen. Landnutzungsänderungen wie Entwaldung und Grünlandumbruch sind zum Erhalt der Kohlenstoffspeicher, Biodiversität und verschiedener Ökosystemdienstleistungen zu verhindern. Wegen der Abkehr von der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse werden in den Green-Szenarien diese Risiken minimiert.

Doch auch bei der Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe können negative Umweltwirkungen entstehen. So kann es bei übermäßiger Strohentnahme zu reduzierten Humusgehalten im Acker kommen, weshalb die Humusbilanz bei der Berechnung der Strohpotenziale für die energetische Nutzung zu berücksichtigen ist. Hier ist anzumerken, dass weiterhin Unsicherheiten bei der Berechnung der Strohpotenziale im Hinblick auf regionale Faktoren, zukünftige Ziele des Humusaufbaus und die Bodenfauna bestehen. Eine mindestens ausgeglichene Humusbilanz sollte bei jeglicher Entnahme von Reststoffen vom Acker die Maßgabe sein. Durch eine der Kompostierung vorgeschaltete Vergärung von Biogut und Grüngut sind keine negativen Auswirkungen auf den Humushaushalt zu erwarten, wenn die kompostierten Gärreste ebenfalls als Dünger genutzt werden. Auch wenn das Humusreproduktionspotenzial von Gärresten aus Gülle im Vergleich zu unvergorener Gülle weiter diskutiert wird, kann man bei der Vergärung von Gülle prinzipiell von positiven Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Neben der Reduktion der THG-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement ermöglicht der höhere

Anteil an mineralischem Stickstoff (FNR, 2018) eine schnellere Stickstoffaufnahme im Vergleich zu unvergorener Gülle und eine verbesserte Fließfähigkeit der Gärreste im Vergleich zu Gülle (LAZBW, 2018) kann die schnellere Verfügbarkeit des Stickstoffs weiter unterstützen.

Wie bereits erwähnt, bleibt die Steigerung der Güllevergärung auf die in den Green-Szenarien angesetzten Anteile eine große Herausforderung. Aktuell werden ca. 20-30 % der anfallenden Menge an Gülle und Mist (UBA, 2019m) in Biogasanlagen eingesetzt. Der Haupteffekt der Güllevergärung im Hinblick auf die THG-Reduktion in den Green-Szenarien ist die Minderung der THG-Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement. Diese könnte auch durch eine Abdeckung der Güllelager mit Fassung und Verbrennung des Gases erreicht werden. Hierfür sind noch technische Lösungen zu entwickeln, doch da der Druck wächst, THG-Emissionen in der Landwirtschaft zu reduzieren, ist die Möglichkeit in den nächsten Jahrzehnten nicht undenkbar. Würden nur 60 % der laut Green-Szenarien anfallenden Menge an Gülle und Mist vergoren werden, würde sich die Stromproduktion um 1,7 bis 3,4 TWh/a reduzieren. Dies wäre durch marginal höhere Strombereitstellung aus Wind- und/oder Solarenergie kompensierbar.

Schließlich können auch beim Betrieb der Bioenergieanlagen negative Umweltwirkungen entstehen, wie zum Beispiel Feinstaubemissionen bei der Verbrennung. Vor allem Kamine und Holzöfen weisen hohe Feinstaubemissionen auf (UBA, 2007), was einer der Gründe ist, weshalb in den Green-Szenarien der Einsatz von Holz zur Wärmeversorgung privater Haushalte schnell zurückgeht. Neben Emissionen von Luftschadstoffen oder Schall sind auch Risiken wie der Austrag wassergefährdender Stoffe (UBA, 2019c) aus oder die Entstehung von Antibiotikaresistenzen (UBA, 2019m) in Biogasanlagen auch bei der Nutzung von Abfall- und Reststoffen zu beachten und zu minimieren.

### **Akzeptanz**

Der rasante Anstieg der Bioenergienutzung ab 2004 hat in der Bevölkerung zu Akzeptanzproblemen geführt, die mit der deutlichen Zunahme der Maisanbauflächen (Stichwort „Vermaisung der Landschaft“) und ethischen Fragestellungen (Debatte um „Teller vs. Tank“) einhergehen. Auch die erhöhten Transportaufkommen in der Nähe von Biogasanlagen ruft häufig Unmut bei der Bevölkerung vor Ort hervor. Entsprechend ist auch bei Anlagen der Ethanolproduktion aus Stroh und bei Güllevergärungsanlagen darauf zu achten, Transporte möglichst gering zu halten. Ein anderer häufig genannter Kritikpunkt bei Biogasanlagen sind die Geruchsemissionen. Bei der Vergärung von Gülle und Bioabfall ist jedoch eher mit einer Geruchsminderung im Vergleich zur Düngung mit unvergorener Gülle bzw. zur offenen Kompostierung zu rechnen (LAZBW, 2018).

Damit die Green-Szenarien Wirklichkeit werden können, bedarf es gezielter Informationskampagnen sowie positiver wie negativer Anreizsetzungen, um Akzeptanz für den Rückgang der Biomassenutzung zu schaffen. Dies betrifft insbesondere Landwirte, die sich mit Biogasanlagen ein zweites Standbein geschaffen haben, und Besitzer von Kaminöfen etc., die vor allem zur Steigerung der Behaglichkeit Holzenergie nutzen.

#### **5.2.3.2.7.2 Zusammenfassung**

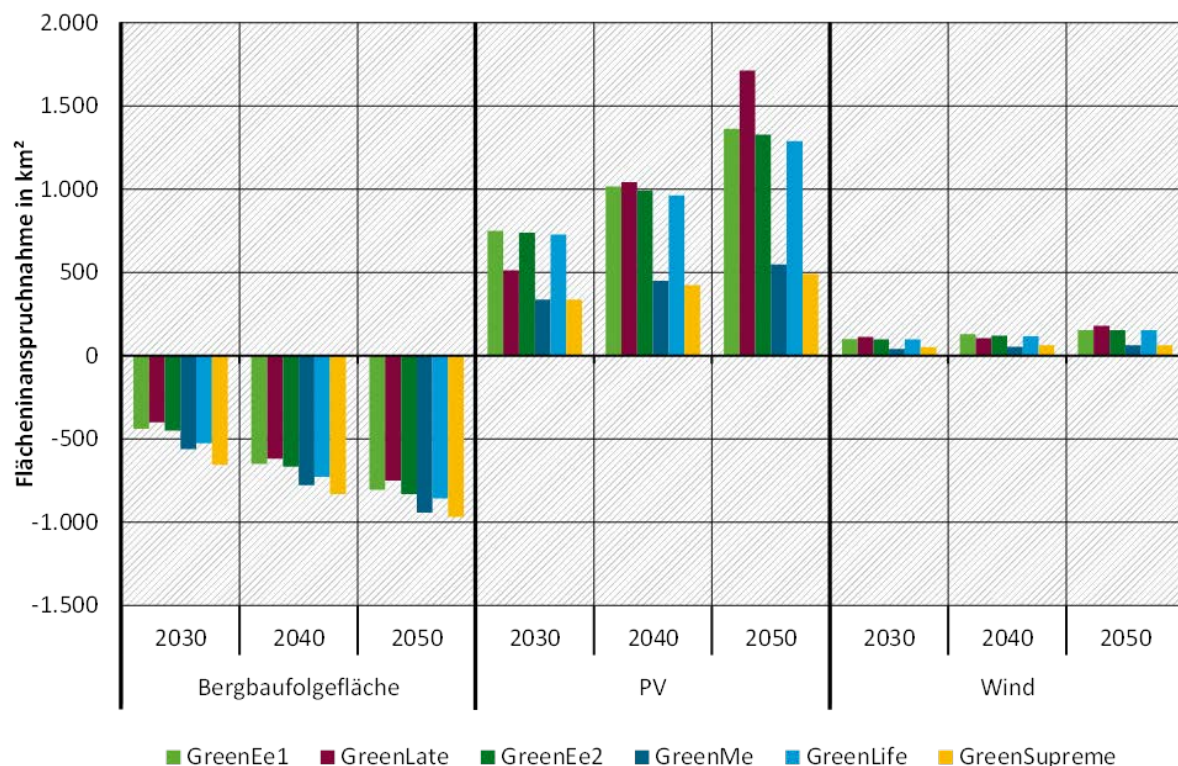
Um den in den Green-Szenarien aufgezeigten sukzessiven Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse umzusetzen, müssten Anreize gesetzt werden, damit der Einsatz von Anbaubiomasse in Biogasanlagen, die noch über eine Festvergütung nach EEG verfügen, reduziert wird. Mit der novellierten Erneuerbaren Energien Richtlinie (EP & Rat der Europäischen Union, 2018a) wurde eine Zunahme der Biokraftstoffe auf Basis von Nahrungs- und Futtermittelpflanzen zwar auf maximal 1 % Steigerung im Vergleich zum Anteil in 2020 begrenzt, für die völlige Abkehr von den entsprechenden Biokraftstoffen wären jedoch weitere Maßnahmen nötig. Besondere Anreize wären auch im Bereich der Wärmenutzung nötig, wo

2017 Biomasse 87 % (BMWi, 2018) der erneuerbaren Energien ausmachte. Vor allem in privaten Haushalten wird überwiegend Derbholz eingesetzt (Döring et al., 2016), dessen Einsatz in den Green-Szenarien ebenfalls drastisch reduziert wird.

#### **5.2.3.2.8 Inanspruchnahme von Flächen durch den Ausbau der erneuerbaren Energien**

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien geht auch eine Inanspruchnahme von Flächen einher. Gleichzeitig werden durch den Ausstieg aus dem Abbau fossiler Energieträger wieder Flächen für andere Nutzungen frei. In Abbildung 5-28 ist für die zentralen Säulen der Energieversorgung, also Windenergie an Land und Photovoltaik, die erwartete Flächeninanspruchnahme dargestellt und den in den Green-Szenarien freiwerdenden Flächen im Transformationspfad gegenübergestellt. Dabei beinhaltet die Kategorie „Bergbaufolgefläche“ den Rückgang der gesamten fossilen und konventionellen Flächeninanspruchnahme. Das heißt, dass hier neben dem Rückgang der heimischen Braunkohleförderung auch der Rückgang in der Bauwirtschaft wegen des geringeren Abbaus von Sand, Kies, Gestein u. ä. erfasst ist. Bei den benötigten Flächen durch die erneuerbaren Energien ist vor allem der Ausbau von Photovoltaik auf Freiflächen relevant. Auch hier werden mit den Annahmen in den Green-Szenarien eine Bandbreite und damit unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

In den Szenarien GreenMe und GreenSupreme, in denen insbesondere Dach-Photovoltaik ausgebaut wird, ist die entsprechend die Flächeninanspruchnahme durch die erneuerbaren Energien deutlich geringer und liegt unterhalb der freiwerdenden Fläche aus Bergbaufolgeflächen. Konkret entspricht die Fläche für die erneuerbaren Energien nur 35 % (GreenMe) bzw. 42 % (GreenSupreme) der wieder freiwerdenden Fläche. Dies bedeutet, dass mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien, wie er in den Szenarien GreenMe und GreenSupreme skizziert wird, deutlich weniger Fläche beansprucht wird als im heutigen fossil geprägten Energiesystem. Berücksichtigt man zusätzlich die freiwerdende Fläche durch den Ausstieg aus dem Anbau von Biomasse für energetische Nutzung, die heute rund 2,2 Mio. ha beträgt, wird dieses Bild umso deutlicher (siehe auch Kapitel 5.7). Die Flächenneuinanspruchnahme bei Windenergie an Land ist deutlich geringer. Dieses Ergebnis bedeutet jedoch nicht, dass diese Flächen bereits im ausreichenden Umfang vorhanden sind. Vielmehr bestehen hierbei große Herausforderungen, die im Kapitel 5.2.3.2.2.1 (Windenergie) sowie auch im Kapitel 5.2.3.2.3.1 (Photovoltaik) thematisiert werden.

**Abbildung 5-28. Entwicklung der Inanspruchnahme der Fläche durch Windenergie an Land und Photovoltaik in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.3.3 Strom - Import

Das deutsche Übertragungsnetz ist über Grenzkuppelleitungen mit den Nachbarstaaten verbunden und so in das europäische Übertragungsnetz integriert. Dies wird auch zukünftig fortbestehen und im Rahmen einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung an Bedeutung gewinnen. Länder mit großen kostengünstigen Standorten von erneuerbaren Energien werden in einem dekarbonisierten Europa andere Staaten beliefern können, so dass der europäische Strombinnenmarkt gestärkt wird. Darüber hinaus ermöglicht das gesamte europäische Übertragungsnetz den großflächigen Ausgleich der Leistungsschwankungen erneuerbarer Energien einzelner Länder. Aufgrund seiner geographischen Lage wird Deutschland dabei mit zunehmendem grenzüberschreitendem Stromhandel als zentrales Stromtransitland an Bedeutung gewinnen.

In den Green-Szenarien wird davon ausgegangen, dass der Ausbau des europäischen Übertragungsnetzes und der Grenzkuppelstellen mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien voranschreitet und die Rahmenbedingungen für einen effektiven Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch geschaffen sind. In allen Green-Szenarien wird diese Ausgleichsmöglichkeit genutzt.

Während Deutschland heute Strom exportiert, wird in den Green-Szenarien unterstellt, dass der jährliche Austausch-Saldo null beträgt. Dies bedeutet, dass bilanziell über das jeweils betrachtete Stützjahr genauso viel Strom in die europäischen Nachbarländer importiert wie aus diesen exportiert wird.

### 5.2.4 Entwicklung der Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung

Im Kapitel 5.2.3 wurde die Deckung der Strombedarfe an Endenergie über alle Anwendungsbereiche hinweg dargestellt. Trotz effektiver Sektorkopplung verbleiben nach



heutigem Kenntnisstand Kraftstoffbedarfe für die Mobilität, siehe Kapitel 5.4, Brennstoffbedarfe zur Prozesswärmeversorgung, siehe Kapitel 5.5 und letztlich müssen die rohstofflichen Bedarfe der Industrie, insbesondere der chemischen Industrie, bereitgestellt werden. In GreenLate werden darüber hinaus auch zur Raumwärmeversorgung erneuerbare Brennstoffe benötigt, siehe Kapitel 5.3.

#### 5.2.4.1 Erneuerbare Brenn-, Kraft- und Rohstoffbedarfe

Erneuerbare Brenn-, Kraft- und Rohstoffe bzw. PtG/PtL-Produkte werden langfristig in folgenden Bereichen benötigt:

- ▶ nationaler Personen- und Güterverkehr (inkl. Binnenschifffahrt),
- ▶ internationaler Luftverkehr,
- ▶ internationaler Seeverkehr,
- ▶ chemische Industrie,
- ▶ Wärmeversorgung, insbesondere Prozesswärme in der Industrie,
- ▶ stabile Stromversorgung (Speicher bzw. Rückverstromung).

Die Bedarfe dieser Bereiche sind stark unterschiedlich und es besteht unterschiedlicher Handlungsdruck. Vor dem Hintergrund der Wiederfreisetzung von Treibhausgasemissionen ist es zweckmäßig, in der chemischen Industrie fossile Energieträger frühzeitig zu substituieren, um Produkte mit langen und mehrfachen Lebenszyklen treibhausgasneutral zu produzieren. Die Verwendung der zur Verfügung stehenden PtG/PtL-Produkte erfolgt den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate, GreenMe und GreenLife nach folgender Reihenfolge, siehe auch Abbildung 5-29:

- ▶ Bis 2030 ausschließlich für die Rohstoffbedarfe der chemischen Produktion von langlebigen Produkten sowie Flugkraftstoffe für ein treibhausgasneutrales Wachsen und zur Vermeidung eines Einsatzes von nicht nachhaltigen Biokraftstoffen in der Flugbranche ab 2020,
- ▶ Nach 2040 weiterhin für die Rohstoffbedarfe der chemischen Industrie, für Flugkraftstoffe zur Deckung des national verursachten internationalen Luftverkehrs sowie dann auch für Kraftstoffe zur Deckung des Bedarfs des national verursachten internationalen Seeverkehrs,
- ▶ Anschließend bis 2050 auch für Kraftstoffe im nationalen Personen- und Güterverkehr (inkl. Binnenschifffahrt), für Brennstoffe zur Wärmeversorgung und zur Stabilisierung der Stromversorgung (Rückverstromung).

Das heißt, dass im Jahr 2030 in diesen Green-Szenarien zuerst relevante Anwendungen in der Industrie und im internationalen Luftverkehr mit erneuerbaren PtG/PtL-Produkten zu gleichen Anteilen versorgt werden. Konkret werden langlebigen Produkte durch frühzeitige Substitution fossiler Ausgangsstoffe in der chemischen Industrie auf Basis erneuerbarer Energie produziert. Anderenfalls würden langlebige Produkte am Ende einer Kaskadennutzung erst nach 2050 bzw. einem noch späteren Zeitpunkt zu fossilen Treibhausgasemissionen führen. Im Luftverkehr besteht dringender Handlungsbedarf, um sicherzustellen, dass das Ziel der ICAO (International Civil Aviation Organisation) zum treibhausgasneutralen Wachsen ab 2020 neben global

marktbasierten Maßnahmen nicht durch den Einsatz von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse erfolgt. Das bedeutet auch, dass in allen Szenarien bis 2040 keine PtG/PtL-Produkte in die Bereiche gelangen, die der nationalen Berichterstattung nach UNFCCC bzw. den Betrachtungsrahmen der Klimaschutzziele der Bundesregierung unterliegen. Vor dem Hintergrund dieser Wirkung kann die Annahme zur Verteilung als konservativ für die gesetzten Klimaschutzziele der Bundesregierung erachtet werden.

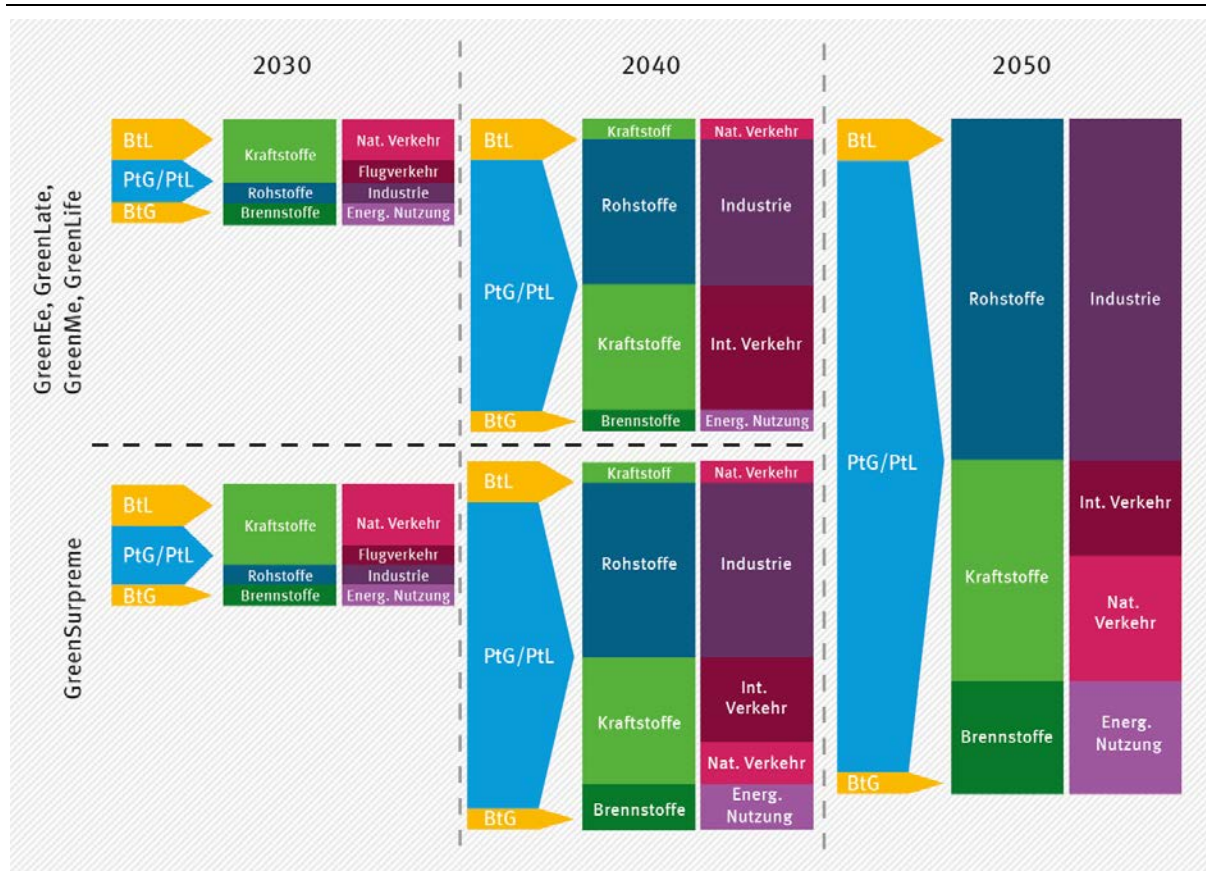
Bis 2040 basiert die erneuerbare Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung im Wesentlichen auf Importen, sowohl fossilen als auch erneuerbaren. National trägt Biogas, Klärgas und BtL aus Stroh zur Versorgung bei. In der Dekade nach 2040, also bei Anteilen von über 80 % erneuerbare Energien in der Stromversorgung, erfolgt auch im Rahmen von konkurrenzfähigen Standorten nationale die PtG-Produktion, siehe Tabelle 5-2. Diese gelangen in die Gasversorgung und verteilen sich über alle Anwendungsbereiche.

In GreenSupreme erfolgt ein schnellerer Transformationsprozess und damit eine schnellere Erschließung erneuerbarer strombasierter Energieträger, so dass frühzeitiger alle Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffmärkte mit erneuerbaren strombasierten Energieträgern erschlossen werden. Dies gilt sowohl für internationale Standorte als auch national. Es wird daher abweichend zu den anderen Green-Szenarien in GreenSupreme folgende Verteilung der zur Verfügung stehenden PtG/PtL-Produkte unterstellt:

- ▶ Bis 2030 gelangen importierte erneuerbare strombasierte Energieträger zu gleichen Anteilen in die chemische Produktion von langlebigen Produkten, in die Versorgung mit Flugkraftstoffe für ein treibhausgasneutrales Wachsen der Flugbranche ab 2020 sowie in die nationale Kraftstoffversorgung.
- ▶ Bis 2040 werden importierte erneuerbare strombasierte Energieträger in die chemischen Industrie zur Deckung der Rohstoffbedarfe, für Flugkraftstoffe zur Deckung des national verursachten internationalen Luftverkehrs sowie Kraftstoffe zur Deckung des national verursachten internationalen Seeverkehrs und für Kraftstoffe im nationalen Personen- und Güterverkehr (inkl. Binnenschifffahrt) verwendet. National erzeugte PtG-Mengen gelangen in die allgemeine Gasversorgung und gelangen anteilig entsprechend der Bedarfe in alle Anwendungsbereiche.

Wie auch bei den anderen Green-Szenarien gelangen auch in GreenSupreme 2030 in den nationalen Verkehr im begrenzten Maße strohbiomassebasierte BtL-Kraftstoffe. Diese kommen zunehmend durch Bioraffinerien in der chemischen Industrie und letztlich 2050 ausschließlich dort zum Einsatz, siehe Abbildung 5-29 und Abbildung 5-30.

Bis 2050 erfolgt in allen Green-Szenarien die vollständige erneuerbare Versorgung für Brenn-, Kraft- und Rohstoffe inkl. der zur Stabilisierung der Stromversorgung (Rückverstromung) benötigten Mengen.

**Abbildung 5-29: Qualitative Darstellung zur erneuerbaren Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung Deutschlands in den Green-Szenarien**

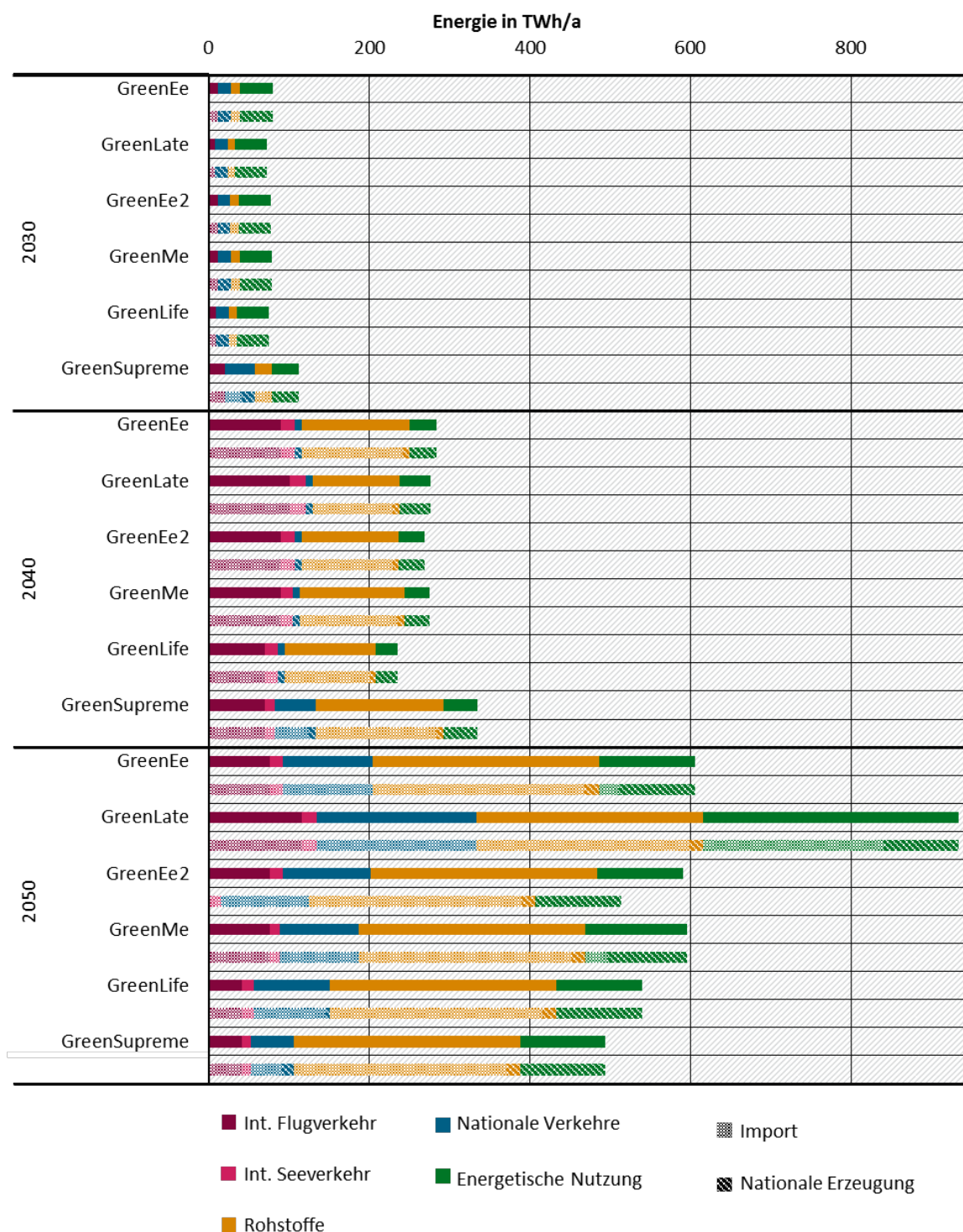
Quelle: eigene Darstellung

So werden in allen Green-Szenarien mittels erneuerbarer Importe in der Dekade bis 2040 die Flugkraftstoffe sowie Schiffstreibstoffe der internationalen Verkehre auf strombasierte erneuerbare Energieträger umgestellt. Die Versorgung der Rohstoffe der chemischen Industrie wird zunehmend umgestellt, mehr als ein Drittel des Rohstoffbedarfes basiert 2040 auf erneuerbaren Energien. In den bodengebundenen nationalen Verkehr gelangt 2030 ausschließlich in GreenSupreme ein kleiner Anteil PtL, der 2040 etwa doppelt so hoch ist als 2030.

Erst in der Dekade bis 2050 wird in allen Bereichen in allen Green-Szenarien eine vollständige erneuerbare Energieversorgung erreicht. Das bedeutet, dass auch in der Stromversorgung erst dann die letzten Erdgaseinsätze, wie auch bei den Brenn- und nationalen Kraftstoffen, durch erneuerbare Energien ersetzt werden. In Abhängigkeit der Reduktion der Endenergiebedarfe an Strom und der Verfügbarkeit international konkurrenzfähiger Standorte erfolgt auch im begrenzten Maße die Bereitstellung von national erzeugten strombasierten Brenn- und Kraftstoffen (siehe Tabelle 5-2). Wie bereits heute wird jedoch ein erheblicher Anteil der gasförmigen und flüssigen Endenergieträger importiert, so dass keine strukturellen Brüche unterstellt sind. Insgesamt werden 2050 rund 8 % in GreenLate und bis zu 24 % in GreenSupreme der Brenn-, Kraft- und Rohstoffbedarfe national bereitgestellt. Davon sind in allen Szenarien rund 18 TWh aus Stroh, welche in die Rohstoffversorgung gelangen und zwischen 73 TWh in GreenLate und 84 TWh in GreenSupreme strombasierte PtG-Methan, siehe Tabelle 5-2. Mit Blick auf die absoluten Werte in Abbildung 5-30 ist zu erkennen, dass im Szenario GreenLate in der Dekade nach 2040 erheblich mehr Anstrengungen erforderlich sind, um die Substitution der fossilen Energieträger und damit die erforderliche

Treibhausgasminderung zu ermöglichen. Infolge der geringeren Energieeffizienz über alle Anwendungen hinweg, werden 2050 in GreenLate die höchsten Bedarfe an erneuerbaren Brenn- und Kraftstoffen benötigt, im internationalen Wettbewerb sind nationale Standorte für PtG/PtL deutlich begrenzter, da auch national in GreenLate mehr Strom benötigt wird, so dass der Importanteil deutlich höher als in den anderen Green-Szenarien ist und die Bedarfe nur mit einem global schneller wachsenden erneuerbaren Brenn- und Kraftstoffmarkt gedeckt werden können.



**Abbildung 5-30: Zeitliche Entwicklung der Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung Deutschlands in den Green-Szenarien nach Anwendungsbereichen und Importen**

Hinweis: die nationale Erzeugung zur energetischen Nutzung basiert bis 2040 in allen allen Szenarien auf der Nutzung von nachhaltiger Biomasse und Klärgas. In GreenSupreme sind 2040 bereits kleine Mengen PtG enthalten, siehe Tabelle 5-2.  
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.2.4.2 Erneuerbare Brenn-, Kraft- und Rohstoff - Importe

Wie bereits im Kapitel 3 dargestellt, erfolgen die Klimaschutzbestrebungen Deutschlands nicht losgelöst von Europa und der Welt. Vor diesem Hintergrund wird davon ausgegangen, dass die

heutigen globalen Vernetzungen und Infrastrukturen im Energiemarkt prinzipiell bestehen bleiben, dieser insgesamt aber auf erneuerbare Energien umgestellt wird. Es wird also kein grundlegender Strukturwandel unterstellt, wie es beispielsweise in Autarkieszenarien der Fall wäre.

Heute basieren rund 70 % der Primärenergieversorgung auf Importen. In den Green-Szenarien ist dies insbesondere vor dem Hintergrund der effizienten Sektorkopplung und dem Heben von Effizienzpotentialen deutlich rückläufig. Insgesamt sinkt die Importabhängigkeit bis auf knapp 50 % der Nettostromerzeugung in GreenSupreme 2050. In GreenLate liegt diese 2050 mit rund 65 % in den Green-Szenarien am höchsten und in etwa auf dem heutigen Niveau.

Die heutigen Importe erfolgen im Wesentlichen zur Versorgung der Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffbedarfe und durchdringen diese Märkte wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

In einem globalen erneuerbaren Energiemarkt ist eine Vielzahl von Standorten denkbar, welche konkurrenzfähige strombasierte erneuerbare PtG/PtL-Produkte bereitstellen könnten. Über bestehende Infrastrukturen, wie das Gasnetz oder mittels Tanker, können diese nach Deutschland transportiert werden. Auch hier ist Deutschland bereits heute in die europäischen Infrastrukturen eingebunden und wie beim Strom wird Deutschland auch beim Gastransport aufgrund der geographischen Lage zentrales Transitland bleiben.

Jeder einzelne denkbare Erzeugungsstandort weist eine unterschiedliche Charakteristik bzgl. der Stromerzeugung, Volllaststunden, Wasseraufbereitung, Kohlenstoffquelle, Transportart, Transportentfernung etc. auf. Um eine Größenordnung zu den benötigten erneuerbaren Stromerzeugungs- und PtG/PtL-Produktionskapazitäten für die Bereitstellung der Importe zur Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung in Deutschland zu erhalten, wurde beispielhaft für alle Green-Szenarien die Produktion in Nordafrika simuliert.

In GreenSupreme wird aufgrund der Szenariencharakteristik unterstellt, dass global schnell ein gemeinschaftliches Verständnis zum ambitionierten Klimaschutz entsteht und auch umgesetzt wird. Dementsprechend erfolgt ein stetiger Ausbau der erneuerbaren Energien zur Produktion von strombasierten Brenn-, Kraft- und Rohstoffen (2030 bereits knapp 63 TWh). In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife wird unterstellt, dass die Umsetzung internationaler Projekte, die Vermarktung von erneuerbaren PtG/PtL-Produkten und Schaffung der hierfür erforderlichen Rahmenbedingungen noch Zeit benötigt. Bis 2030 werden in diesen Szenarien rund 50 TWh erneuerbarer Strom für die PtG/PtL Produktion bereitgestellt, wofür der Ausbau am beispielhaften Standort von rund 8 GW Wind onshore und 9 GW Photovoltaik erforderlich sind. So können 2030 grob 23 TWh PtG/PtL-Produkte bereitgestellt werden. Nach 2030 erfolgt dann ein entsprechender stärkerer Ausbau, welcher den unstetigen Start kompensieren muss.

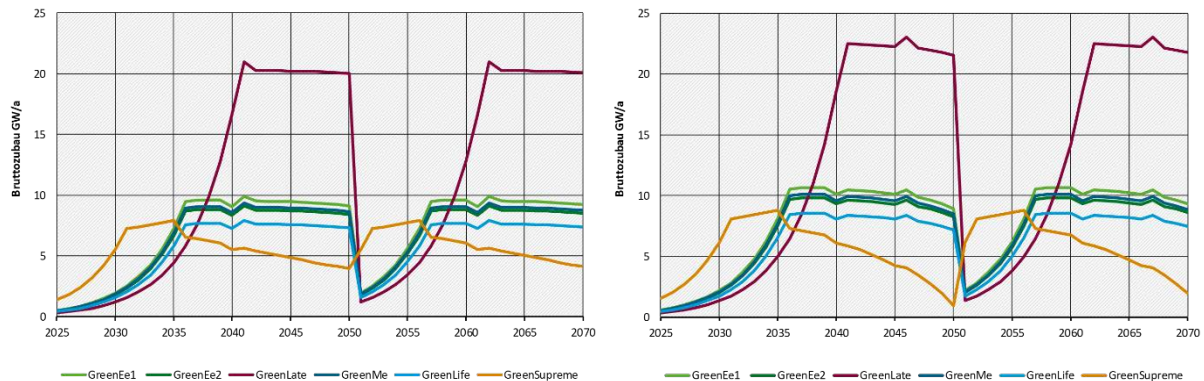
In GreenLate verschärft sich dieses Bild nochmals. Zum einen, weil weniger Strom in den Anwendungen direkt genutzt wird und somit die Brenn- und Kraftstoffbedarfe höher sind und zum anderen, weil erst am Ende der ersten Jahrhunderthälfte die Klimaschutzanstrengungen intensiviert werden. Wenn, wie im GreenLate-Szenario der scheinbar einfache Weg gewählt wird, in dem Energieeffizienzpotentiale nicht konsequent erschlossen und an konventionellen Energieträgern und deren Infrastruktur festgehalten wird, muss im Pfad deutlich mehr erneuerbare Stromerzeugung ausgebaut werden. Konkret werden in GreenLate zwischen 2035 und 2040 durchschnittlich 10,5 GW Wind onshore und gut 11,5 GW Photovoltaik pro Jahr benötigt, deren Ausbau sich nach 2040<sup>52</sup> auf durchschnittlich 20,3 GW Wind onshore und

---

<sup>52</sup> Analog zu den nationalen Kapazitäten, ist diese ab 2040 in geringem Maße auch auf den Ersatz der Kapazitäten, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen zurückzuführen.

22,2 GW Photovoltaik pro Jahr nochmals steigert, siehe Abbildung 5-31. In 2050 werden in GreenLate rund 1800 TWh erneuerbarer Strom zur Deckung der importierten PtG/PtL-Bedarfe benötigt, wohingegen in GreenEe2 und GreenMe nur rund 1000 TWh, in GreenLife knapp 900 TWh und in GreenSupreme nur 800 TWh benötigt werden. In GreenSupreme erfolgt im Vergleich zu allen anderen Szenarien auch bei der Erschließung internationaler Standorte ein ambitioniertes Vorgehen, so dass bereits 2030 knapp 63 TWh PtG/PtL-Produkte bereitgestellt werden, welche zu gleichen Teilen in die internationalen Verkehr, die Herstellung von langlebigen Produkten und die nationale Kraftstoffversorgung gelangen.

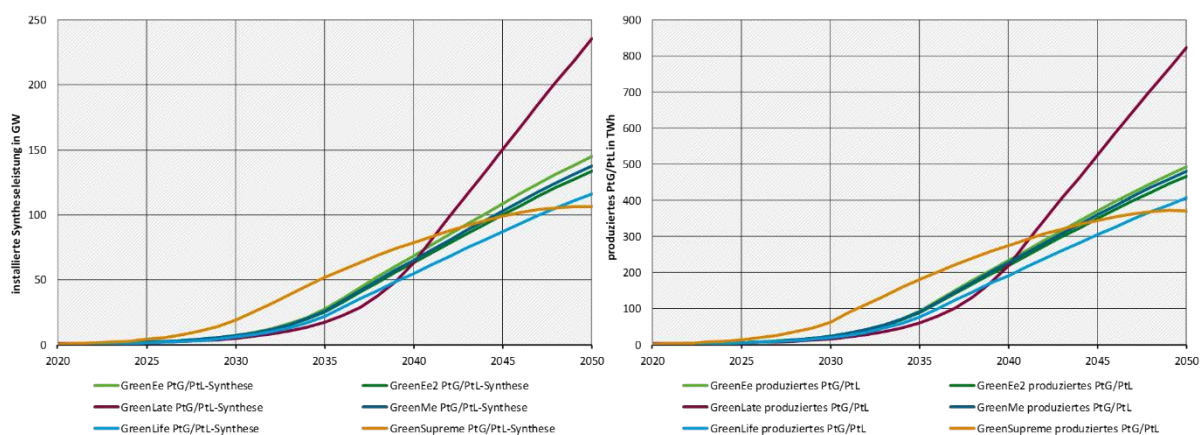
**Abbildung 5-31: Entwicklung des Ausbaus der erneuerbaren Energien für die Importe für die verschiedenen Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die benötigten Produktionskapazitäten für die Importe sind in Abbildung 5-32 zu sehen. In GreenLate werden bis 2050 235 GW an Syntheseeinrichtungen benötigt, um rund 825 TWh kohlenstoffhaltiger Produkte zu erzeugen. In GreenSupreme werden hingegen nur 106 GW für 370 TWh benötigt. Dieser deutliche Unterschied ist gleichfalls mit deutlich höherer Rohstoffinanspruchnahme verbunden.

**Abbildung 5-32: Entwicklung der PtG/PtL-Produktionskapazitäten für die verschiedenen Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### TextBox 5-2 Einfluss der nicht-energetischen Bedarfe an Energieträgern

Wie bereits in Tabelle 5-3 und im Kapitel 5.2.2.5 erkenntlich, ist der nicht-energetische Bedarf an Rohstoffen für die chemische Industrie konstant über alle Szenarien.



In GreenSupreme macht dies 43 % der gesamten Brenn-, Kraft- und Rohstoffbedarfe aus. Und hat damit einen erheblichen Einfluss auf die erforderlichen Erzeugungskapazitäten und erforderlichen Rohstoffbedarfe für die Anlagenerrichtungen.

Vor dem Hintergrund der Konsumveränderung in GreenLife und GreenSupreme zu weniger Verpackung, reparaturfähigen Produkten und nachhaltigeren Konsum erscheint das kumulierte Wachstum der chemischen Industrie von 80 % (UBA, 2014c) zu optimistisch. Vielmehr scheint ein geringes Wachstum szenarienkonsistenter. Aufgrund der vielfältigen Verflechtungen der chemischen Industrie konnte keine modellendogene Produktionsberechnung erfolgen.

In der Literatur schwanken die Angaben in Szenarien zur kumulierten Entwicklung bis 2050 stark. Sie liegen bei 28 % (Fraunhofer ISI et al., 2017) über 57 % (BDI, 2018) bis hin zu den in den Green-Szenarien unterstellten 80 % (UBA, 2014c).

Bei einer deutlich geringen kumulierten Entwicklung von bspw. 28 % (Fraunhofer ISI et al., 2017), ergeben sich auch deutlich geringere Rohstoffbedarfe in Höhe von nur noch knapp 100 TWh. Dies würde dazu führen, dass die für die Importe nach Deutschland erforderliche Nettostromerzeugung von gut 800 TWh auf 415 TWh reduziert werden könnte. Damit wären geringere rohstoffliche Aufwendung für etwa 60 GW weniger Windkraftanlagen, 65 GW weniger Photovoltaikanlagen und gut 50 GW weniger Elektrolyseanlage. Die Importabhängigkeit würde sich damit auf etwa 1/3 bezogen auf die Nettostromversorgung bzw. Primärenergie reduzieren.

## 5.2.5 Infrastrukturen für die Energieversorgung

Die Umstellung der nationalen Energieversorgung auf erneuerbare Energien mit dem oben dargestellten Ausbau geht auch einher mit dem Ausbau der dafür erforderlichen Infrastrukturen.

### 5.2.5.1 Strom

Bis 2050 steigt der Strombedarf in den Green-Szenarien trotz erheblicher Anstrengungen im Bereich Effizienz vor dem Hintergrund der effizienten Sektorkopplung und damit der direkten Stromnutzung in allen Anwendungsbereichen. Die Erzeugung von Strom und dessen Transport wird damit zur zentralen Aufgabe für eine gelungene Energiewende.

Wegen des Ausbaus der erneuerbaren Energien verlagern sich die Schwerpunkte der Stromerzeugung in eher ländlich geprägte Regionen, abseits der Verbrauchsschwerpunkte. Da in allen Green-Szenarien bereits 2030 der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung über 70 % liegt, nehmen diese regionalen Disparitäten noch weiter zu. Große Windparks entstehen vor allem in Ost- und Norddeutschland und auf See. Der dort erzeugte Strom muss zu den Lastschwerpunkten im Süden und Westen Deutschlands transportiert werden, wobei das bestehende Netz bereits jetzt an die Grenzen seiner Leistungsfähigkeit stößt und daher schnell ausgebaut werden muss. Aber nicht nur die Übertragungs- sondern auch die Verteilnetze, an die der Großteil der erneuerbaren Energien-Anlagen angeschlossen ist, müssen zügig ausgebaut werden. In den Green-Szenarien wird ein reger Stromaustausch im Rahmen des europäischen Energiebinnenmarktes unterstellt, um europaweite Potentiale der erneuerbaren Energien für den großräumigen Ausgleich von regionalen Schwankungen nutzen zu können. Hierfür ist der Ausbau des europäischen Verbundnetzes sowie der Grenzkuppelleitungen erforderlich.

In den Green-Szenarien basieren die Annahmen für die weitere Netzentwicklung in den verschiedenen Spannungsebenen auf dem Netzentwicklungsplan (Ausbaurahmen Szenario C) (Bundesnetzagentur, 2016) und der DENA Verteilnetzstudie (dena, 2012). Im Netzentwicklungsplan wird zwar ein geringer Anteil erneuerbarer Energien (65 %) unterstellt



als in den Green-Szenarien. Jedoch sind die berechneten Leistungen bis 2030 in ähnlicher Größenordnung und die höheren Anteile erneuerbarer Energien basieren auf höheren Effizienzannahmen in den Green-Szenarien.

Beim Netzausbau ist vor dem Hintergrund der Akzeptanz in der Bevölkerung und der gesetzlichen Rahmenbedingungen mit einem steigenden Erdkabelanteil auf Hoch- und Höchstspannung zu rechnen. So ist der Bau von HGÜ-Erdkabeltrassen (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) geplant, obgleich diese aufgrund der Bettungssande materialintensiver als Freileitungen sind. Auch für Wechselstromleitungen sind auf Höchstspannungsebene (380 kV) Erdkabel-Pilotprojekte gesetzlich vorgesehen und auf Höchstspannungsebene (110 kV) werden neue Leitungen vermehrt als Erdkabel geplant. Vorteilhaft dabei ist, dass Erdkabel weniger anfällig gegenüber Temperatureinflüssen, Schnee- und Eislasten sowie Wind sind als Freileitungen (UBA, 2015b).

In den Green-Szenarien wird diese Entwicklung mitberücksichtigt, so wird insbesondere im Verteilnetz vermehrt Erdkabel zum Einsatz kommen. Dies sowie die jeweils verwendeten Materialien sind in Tabelle 5-9 und Tabelle 5-10 dargestellt. Sämtliche Annahmen und Berechnungen bezüglich der Materialien des Stromnetzes werden für die Green-Szenarien aus (Wiesen et al., 2017) übernommen. Die Verteilung von Freileitung und Erdleitung pro Netzebene oder dem Anteil von Kupfer- bzw. Aluminiumleitern in den Leitungen verändert sich im Laufe des Transformationspfades nicht.

**Tabelle 5-9: Materialannahmen der Strominfrastruktur in GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife**

Netzstrukturdaten	Erdkabel	Freileitung	Masten (Freileitung) Stahl/Beton/Holz	Materialanteil (nur Erdkabel) Alu/Kupfer	Materialanteil (nur Freileitung) Alu/Kupfer
Hoch- und Höchstspannung (HS)	5 %	95 %	100/0/0 %	100/0 %	100/0 %
Mittelspannung (MS)	75 %	25 %	60/20/20 %	20/80 %	50/50 %
Niederspannung (NS)	90 %	10 %	20/40/40 %	65/35 %	50/50 %

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Mit dem Fokus auf Materialeffizienz im GreenMe-Szenario werden abweichende Annahmen getroffen. Da Erdkabel aufgrund der Bettungssande materialintensiver als Freileitungen sind, wird im Szenario GreenMe der Anteil an Freileitungen erhöht und werden alle laut Netzentwicklungsplan zu bauenden Hoch- und Höchstspannungsleitungen ab 2025 als Freileitung im Szenario berücksichtigt. Auch im Mittelspannungsnetz wird ab 2025 der Anteil an Freileitungen erhöht und der Zubau zu gleichen Anteilen von Erdkabel und Freileitung unterstellt. Im Niederspannungsbereich wird aufgrund von bestehenden Synergieeffekten mit anderen Infrastrukturen die identische Annahme zu den anderen Green- Szenarien getroffen. Bei den verwendeten Materialien erfolgt ein verstärkter Einsatz von Aluminium. Hintergrund ist zum einen der höhere kumulierte Rohstoffaufwand von Kupfer als Aluminium aufgrund der geringeren Konzentration in den Minen in der Materialflusslogik. Zum anderen ist die globale Versorgung mit Kupfer etwas eingeschränkter als bei Aluminium. Sowohl Kupfer als auch Aluminium (in Verbindung mit Stahl) werden bereits als Leiter im Stromnetz eingesetzt. Kupfer

weist jedoch etwas bessere Eigenschaften z. B. hinsichtlich der Leitfähigkeit auf, weshalb es derzeit bevorzugt eingesetzt wird. Die abweichenden Annahmen von GreenMe, welche gleichfalls in GreenSupreme unterstellt werden, sind in Tabelle 5-10 zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 5-10: Materialannahmen der Strominfrastruktur in GreenMe und GreenSupreme**

Netzstrukturdaten	Anteil Erdkabel Ist-Stand (Alu/Kupfer) [%]	Anteil Erdkabel Neu-Bau (Alu/Kupfer) [%]	Anteil Freileitung Ist-Stand (Alu/Kupfer) [%]	Anteil Freileitung Neubau (Alu/Kupfer) [%]
Hoch- und Höchstspannung (HS)	100/0	100/0	100/0	100/0
Mittelspannung (MS)	20/80	50/50	50/50	Bis zu 80/mind.20
Niederspannung (NS)	65/35	80/20	50/50	80/20

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Der Netzausbau verursacht aber auch Auswirkungen auf Mensch und Umwelt, wie bspw. die Beeinträchtigung des Landschaftsbilds, mögliche Gesundheitsrisiken infolge elektrischer und magnetischer Felder, die Gefährdung von Vögeln durch Leitungsanflug, die Zerschneidung von Lebensräumen durch neue Trassen oder die Veränderung der Bodenqualität in Mooren und Feuchtgebieten bei Erdkabelverlegung. Der Ausbau sollte daher so umweltschonend wie möglich erfolgen, bspw. durch das sogenannte NOVA-Prinzip (Netz-Optimierung vor Verstärkung vor Ausbau), Nutzung bereits bestehender Trassen, Vogelschutzmarker an den Freileitungen, ökologisches Schneisenmanagement, etc. Wie stark sich einzelne Netzausbau-Vorhaben auf die Umwelt auswirken, ist pauschal kaum zu beantworten. Wichtig ist es daher, bei der Trassenplanung alle Umweltaspekte abhängig von den örtlichen Gegebenheiten genau zu betrachten. Der Gesetzgeber hat dafür sogenannte Schutzgüter definiert, die im Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) aufgelistet sind:

- Menschen, insbesondere die menschliche Gesundheit,
- Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,
- Fläche, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,
- Kulturelles Erbe und sonstige Sachgüter.

Die strategische Umweltprüfung und die Öffentlichkeitsbeteiligung sollten als Chance genutzt werden, Umweltbelange rechtzeitig und umfassend in die Planung einzubringen und eine umwelt- und naturverträgliche sowie aus Sicht der Öffentlichkeit nachvollziehbare und fair durchgeführte Netzausbauplanung zu erreichen. Eine höhere Akzeptanz kann im Ergebnis auch zu einer Beschleunigung des Verfahrens führen.

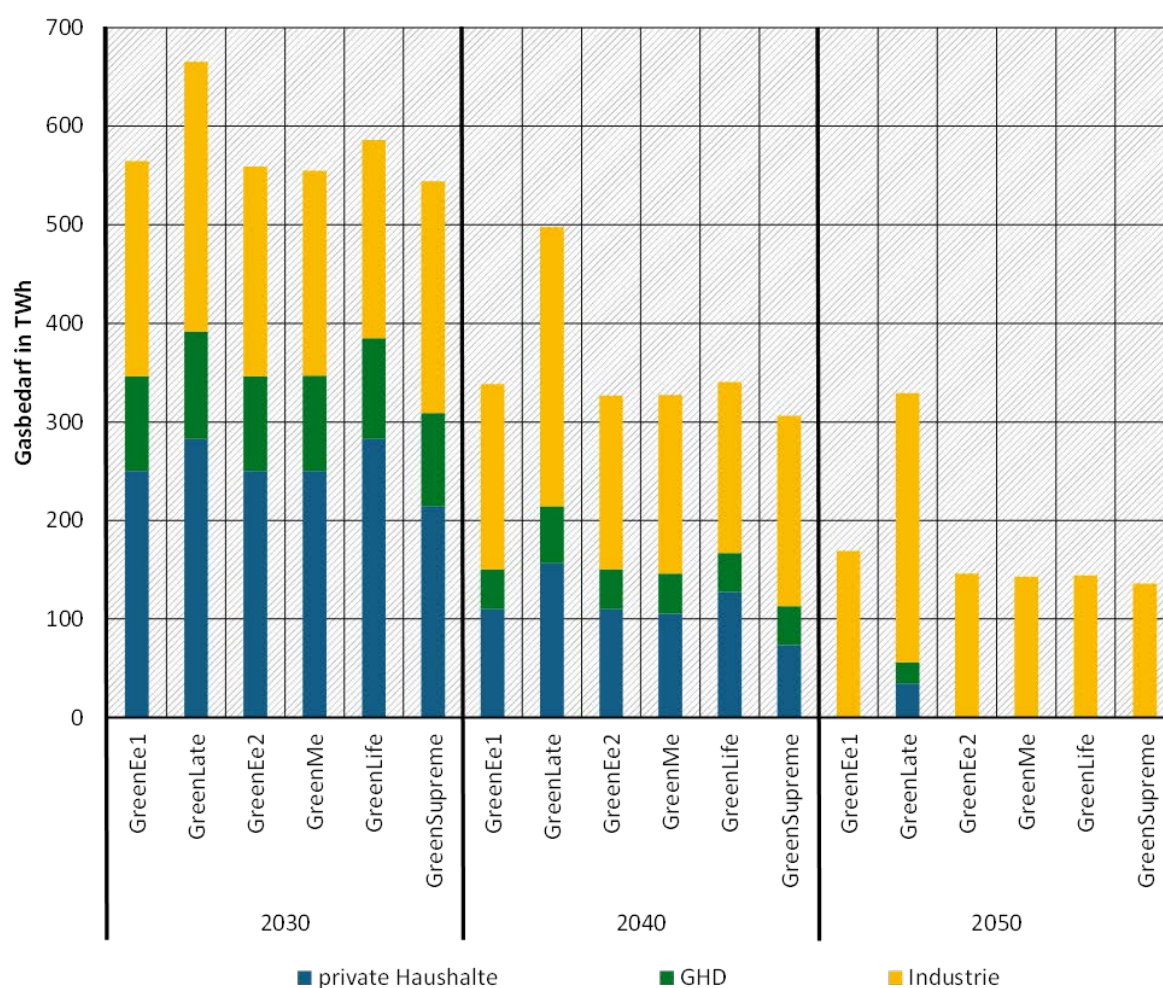
Bei Verzögerungen im Netzausbau kann für eine Übergangszeit auch der sogenannte Redispatch<sup>53</sup> zur Engpassentlastung in einem etwas größeren Umfang genutzt werden. Zudem gibt es Möglichkeiten, wie die Bestandsnetze kurz- und mittelfristig besser ausgelastet werden

<sup>53</sup> Dabei wird auf Anforderung des Übertragungsnetzbetreibers die Leistungseinspeisung von Kraftwerken angepasst. Hintergrund ist es, auftretende regionale Überlastungen im Übertragungsnetz zu vermeiden oder zu beseitigen.

können, bis sie ausreichend verstärkt und ausgebaut sein werden. Dazu zählen bspw. kurzfristig umsetzbare Verstärkungsmaßnahmen, flächendeckender Einsatz von Freileitungsmonitoring, Einsatz von Batteriespeichern im Übertragungsnetz, etc.

#### **5.2.5.2 Gas**

Die Gasbedarfe sinken in allen Szenarien deutlich im Vergleich zum heutigen Niveau. Insbesondere die Energiewende und Effizienzstrategie im Bereich der Raumwärmeversorgung, für welche 2017 etwa 53 % (AGEB, 2019) des Gasbedarfes benötigt werden, führt zu diesen deutlichen Änderungen. In Kombination mit dem Fuel-Switch zu strombasierten Techniken sinkt der Gasbedarf in den Green-Szenarien bis 2050 auf null. Selbst in GreenLate werden 2050 nur noch 57 TWh zur Raumwärmeversorgung verwendet. In allen anderen Szenarien kommen erneuerbare Gase insbesondere strombasiertes Methan aus Power to Gas aus Kosten- und Effizienzgründen nur dort zum Einsatz, wo es technisch erforderlich ist. Das GreenLate-Szenario, in welchem in der Industrie Technikinnovationen verschlafen werden, die Effizienzsteigerungen in Gebäuden langsamer voranschreiten und an konventionellen Techniken festgehalten wird, verzeichnet mit knapp 330 TWh ein mehr als doppelt so hohen Gasbedarf als die anderen Green-Szenarien. In diesem Szenario erfolgt nach 2040 bis 2050 vor allem eine Eins-zu-Eins-Substitution von Erdgas mit erneuerbarem strombasiertem Gas, um die Treibhausgasminderungen zu erreichen. Wie in Abbildung 5-33 zu sehen ist, verbleibt bis 2050 vor allem die Industrie als Gasabnehmer.

**Abbildung 5-33: Entwicklung von Gas als Endenergieträger in den verschiedenen Bereichen<sup>54</sup>**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die daraus resultierenden infrastrukturellen Herausforderungen betreffen sowohl das Verteil- als auch das Fernleitungsnetz. Strukturelle Änderungen sind vor allem im Verteilnetz Deutschland zu erwarten. Insbesondere in Gebieten, die durch Wohngebiete und Abnehmer aus dem Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungsbereich geprägt sind und heute einen hohen Gasbedarf haben, erfolgt mit dem Fuel-Switch hin zu strombasierten Versorgungstechniken eine deutliche Reduzierung der Auslastung dieser Verteilnetze. Bis hin, dass Netzabschnitte nicht mehr wirtschaftlich betreibbar sind und Stilllegungen erforderlich sind (Wachsmuth, Michaelis, et al., 2019). Aus Basis vereinfachter Berechnungen kann von einer Stilllegung von mindestens rund 1/3 der Verteilnetze ausgegangen werden (Wachsmuth, Michaelis, et al., 2019). Auch geht in den Szenarien eine sinkende Auslastung im Fernleitungsnetz einher, so dass die Verdichterleistungen und Kompressoreinheiten in ihrer Leistung angepasst werden müssen (Wachsmuth, Michaelis, et al., 2019). Vor dem Hintergrund der dennoch erforderlichen Importe, die energetisch am effizientesten über das Gasnetz transportiert werden können (Schütz & Härtel, 2016), kann davon ausgegangen werden, dass die Importrouten über das Fernleitungsnetz sich ändern und vermutlich sich teilweise die Gasflussrichtungen umkehren.

Ein globaler Markt für strombasierte erneuerbare Gase muss sich erst noch entwickeln, siehe Kapitel 5.2.4.2. Hier kann zur Diversifizierung der Exportländer und mehr Wettbewerb sowie

<sup>54</sup> Die Grafik bezieht sich nur auf die energetischen Anwendungen. D. h., die rohstoffliche Nutzung der Industrie, insbesondere der chemischen Industrie, ist nicht mit dargestellt.



damit verbundene höher Versorgungssicherheit der Aufbau einer nationalen LNG-Infrastruktur bedacht werden. So können weit entfernte Lieferländer erschlossen werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass der Transport über Gaspipelines immer energetisch effizienter ist. Insofern müssten die LNG-Lieferländer besonders günstig strombasiertes erneuerbares Gas liefern können, um trotz der energetischen Mehrverluste konkurrenzfähig zu sein.

## **5.2.6 Entwicklung der energiebedingten Treibhausgasemissionen**

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Emissionsquellgruppe Energie (CRF 1A und CRF 1B) beinhaltet neben der Energiewirtschaft auch sämtliche Brenn- und Kraftstoffbedarfe. Enthalten sind also alle THG-Emissionen aus der energetischen Nutzung fossiler Energieträger also auch der Strom-, Brenn- und Kraftstoffverbrauch der Sektoren private Haushalte, Verkehr, Industrie und GHD. Dies ist damit nicht identisch zu dem Sektor Energie des Klimaschutzplans. Letzter wird in Kapitel 6.1.1.1 thematisiert. Generell werden die energiebedingten Treibhausgasemissionen durch zwei Aspekte beeinflusst. Zum einem den Anteil der erneuerbaren Energien in der Strom-, Brenn- und Kraftstoffversorgung sowie den Bedarfen an Energieträgern.

### **5.2.6.1 Integration erneuerbarer Energien in die Energieversorgung**

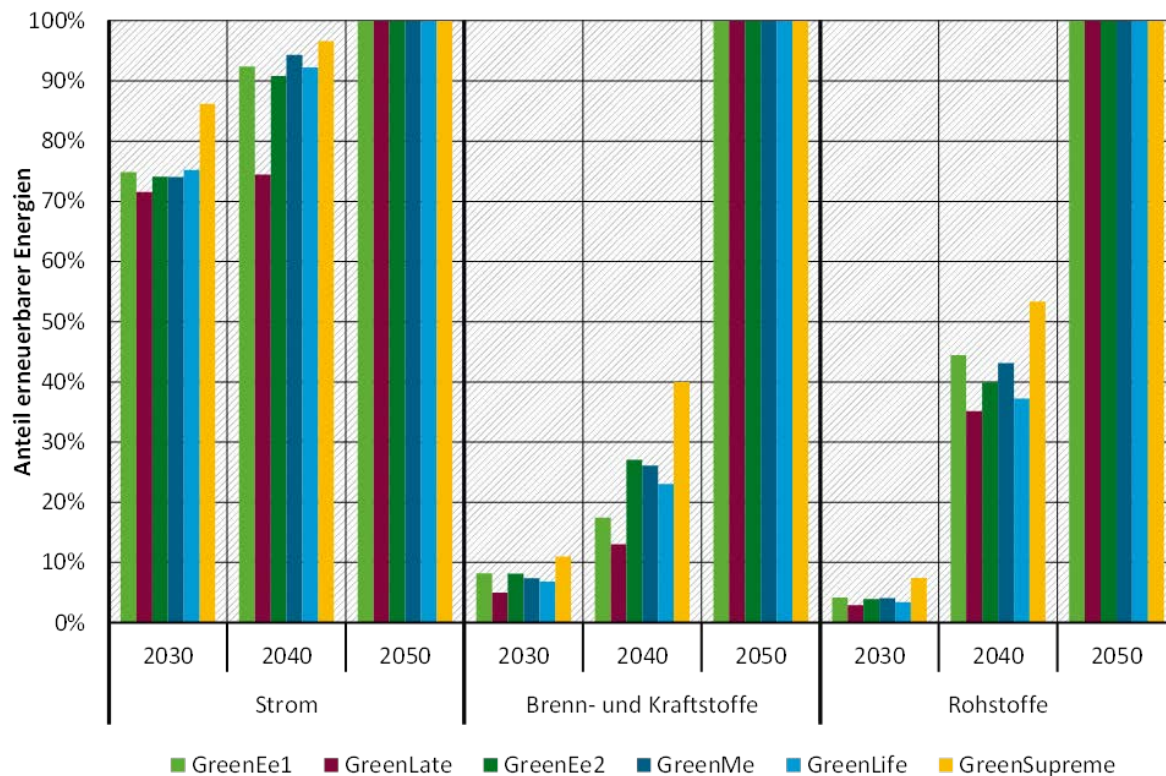
Aus Klimaschutzsicht erfolgt in den Green-Szenarien eine effektive Verwendung von erneuerbarem Strom (siehe Kapitel 5.2.1.1.1), also eine schnelle Substitution der fossilen Stromerzeugung. In allen Szenarien ist bereits 2030 der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung über 70 %, wie in Abbildung 5-34 zu sehen ist. In GreenSupreme sogar über 80 %. 2040 basiert die Stromversorgung zu über 90 % in allen Szenarien bis auf GreenLate auf erneuerbaren Energien.

Vor dem Hintergrund der langfristigen Treibhausgasminderungsziele und eines industriepolitischen erforderlichen Ausbaupfades, um die langfristigen Kapazitäten zu gewährleisten, werden in allen Szenarien bereits 2030 erneuerbare Kohlenwasserstoffe aus PtG/PtL bereitgestellt, siehe auch Kapitel 5.2.4.2. Die Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung basieren 2040 immer noch im Wesentlichen auf fossilen Energieträgern, mit Ausnahme des GreenSupreme-Szenarios, das auch hier wieder sein hohes Ambitionsniveau zeigt. Da in allen Anwendungen in GreenSupreme bis spätestens 2040 vollständig auf die energetische Nutzung von Kohle verzichtet und bereits frühzeitig auch der Kraftstoffmarkt mit erneuerbaren PtL-Kraftstoffen durchdrungen wird, basiert die Brenn- und Kraftstoffversorgung bereits zu knapp 40 % auf erneuerbaren Energien. In der Rohstoffversorgung sind es sogar über 50 %, wie in Abbildung 5-29 zu sehen ist.

Tendenziell steigt der Anteil der erneuerbaren Energien in der Rohstoffversorgung schneller an als in der Brenn- und Kraftstoffversorgung. Hintergrund ist, dass die Rohstoffe der chemischen Industrie Ausgangsbasis für Produkte sind, welche im Sinne der Kreislaufwirtschaft erst nach mehreren Nutzungszyklen energetisch verwertet werden. Dementsprechend werden die Treibhausgasemissionen der Rohstoffe zeitlich versetzt freigesetzt. Brenn- und Kraftstoffe werden hingegen zeitnah verwendet, so dass deren Umstellung auf erneuerbare Energien sich unmittelbar in der Minderung von Treibhausgasemissionen widerspiegelt. Erst 2050 wird in allen Szenarien eine vollständige erneuerbare Energieversorgung erreicht. In Abbildung 5-34 wird nochmals deutlich, dass im GreenLate-Szenario in der letzten Dekade deutlich mehr Anstrengungen erforderlich sind als in all den anderen dargestellten Szenarien.

In der Abbildung 5-34 sind bei der Brenn- und Kraftstoffversorgung auch die internationalen Verkehre berücksichtigt.<sup>55</sup> Der Anteil erneuerbarer Energien für die Brenn- und Kraftstoffversorgung der reinen nationalen Bedarfe liegt unterhalb der dargestellten.

**Abbildung 5-34: Entwicklung des Anteils erneuerbaren Energien an der Energieversorgung für die verschiedenen Green-Szenarien**



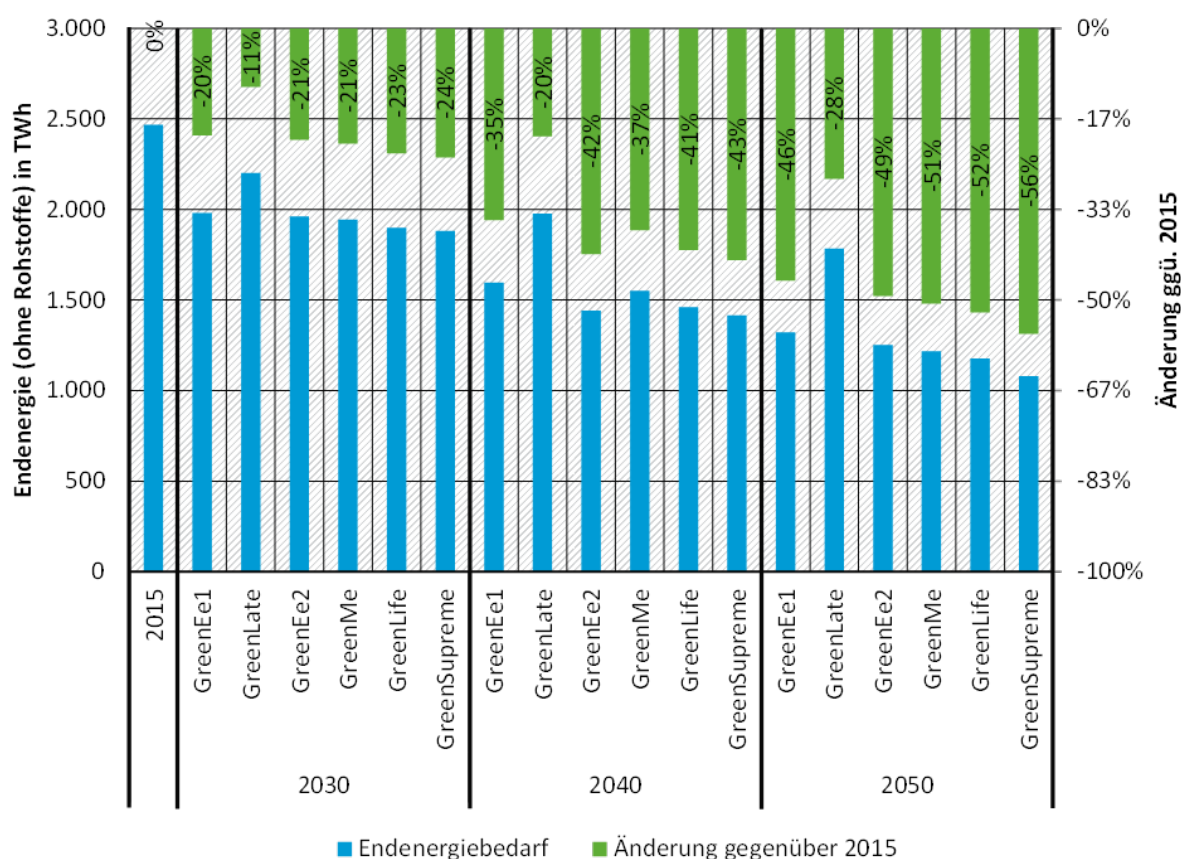
Hinweis: Brenn- und Kraftstoffe hier inklusive internationaler Verkehre

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.6.2 Reduktion des Endenergiebedarfes

Die Entwicklung der verschiedenen Endenergiebedarfe wurde bereits im Kapitel 0 ausführlich dargestellt. In Abbildung 5-35 ist ergänzend die Änderung des energetischen Bedarfes, also ohne den nicht-energetischen Bedarf für die chemische Industrie, zu sehen. Bis 2030 liegen die Szenarien, bis auf GreenLate, in ähnlicher Größenordnung. GreenLate hinkt hier bereits deutlich hinterher und kann bis 2050 den Endenergiebedarf nur um 28 % mindern. Im Vergleich dazu kann in GreenSupreme mit hohen Bedarfsminderung und -vermeidungen eine Reduktion um 56 % gegenüber 2015 erreichen. Beim Vergleich von GreenEe2 und GreenMe werden die Effekte der Materialeffizienz und beim Vergleich von GreenEe2 und GreenLife die Effekte der veränderten Lebensweise deutlich.

<sup>55</sup> Diese sind in der UNFCCC-Rahmenkonvention jedoch nur nachrichtlich zu erwähnen und werden in der Treibhausgasemissionsbilanzierung nicht berücksichtigt.

**Abbildung 5-35: Entwicklung des Endenergiebedarfes der Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.2.6.3 Treibhausgasminderungen

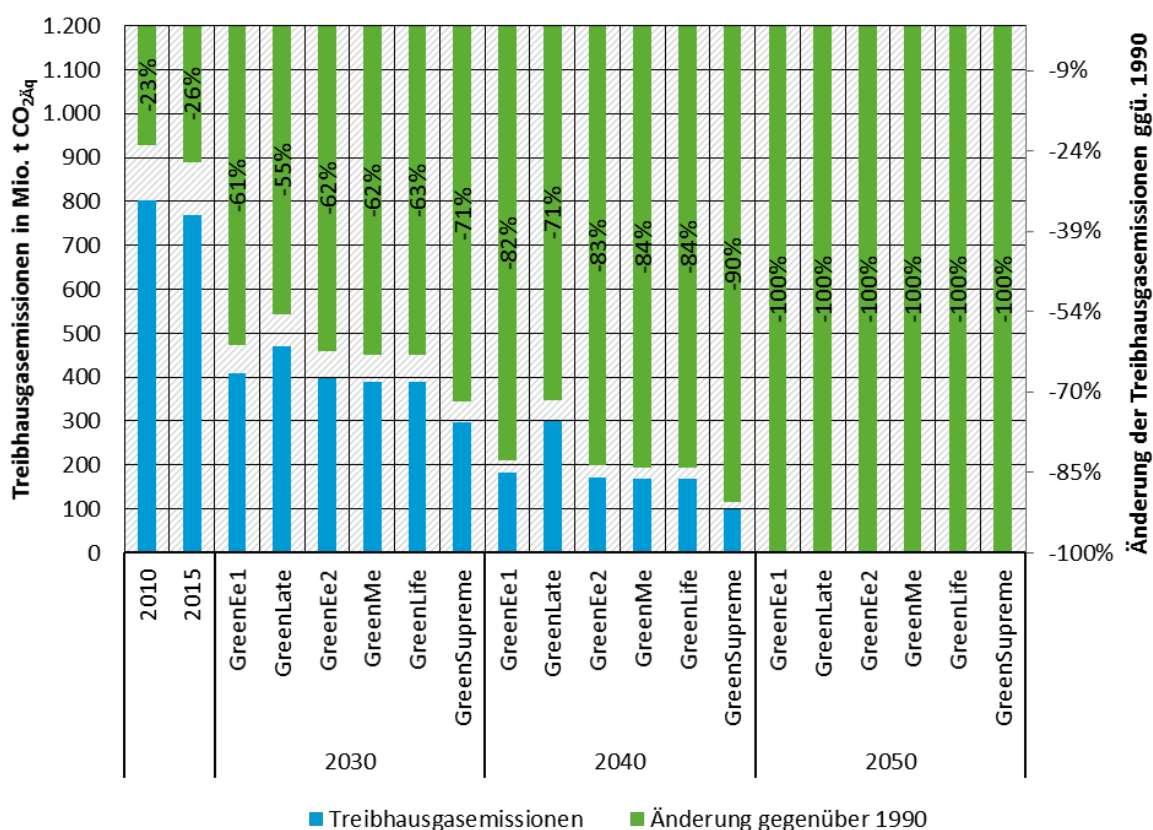
Die Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Energie betrugen 1990 1.035,7 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, welche bereits bis 2015 um 26 % gemindert werden konnte. Mit der schnellen Dekarbonisierung der Stromversorgung und der Integration von aus Klimasicht hocheffizienten PtX-Techniken, wie Elektromobilität, wird in den allen Green-Szenarien insbesondere bis 2030 ein erheblicher Beitrag zur Treibhausgasminderung in der Quellkategorie Energie geleistet. In GreenSupreme mit dem frühen Ausstieg aus der Kohleverstromung, noch schnellerer Marktintegration der Elektromobilität und darüber hinaus erneuerbarer PtL-Kraftstoffe, wird die höchste Treibhausgasminderung erreicht. Die energiebedingten Treibhausgase können um 55 % in GreenLate bis 71 % in GreenSupreme reduziert werden, wobei der eingeleitete Ausstieg bzw. bei GreenSupreme der vollzogene Ausstieg aus der Kohleverstromung die Minderungen dominiert.

In der Dekade nach 2030 werden die Minderungen durch Effizienzsteigerungen, Vermeidungen und Verlagerung auf strombasierte effiziente Techniken durch Integration von PtX-Techniken in allen Anwendungsbereichen erreicht. 2040 werden noch 29 % in GreenLate und 10 % in GreenSupreme der energiebedingten Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 emittiert. Im Vergleich von GreenLate zu den Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife wird die Bedeutung der Energieeffizienz und Integration treibhausgasarmer effizienter Techniken (PtX-Techniken) besonders offenkundig. In allen Szenarien erfolgt 2040 keine Kohleverstromung mehr und während in GreenLate der Bedarf nur um 20 % reduziert werden konnte (siehe Abbildung 5-35) erreichen die genannten anderen Szenarien doppelt so hohe Bedarfsminderungen. In Kombination mit einem Stärkeren Ausbaus der erneuerbaren Energien

werden so mehr als 10 %-Punkte höher THG-Minderungen als in GreenLate erreicht. In der letzten Dekade werden in allen Szenarien dann auch die Brenn- und Kraftstoffmärkte mit erneuerbaren PtG/PtL-Produkten versorgt und in die energetische Nutzung gelangen nur noch Abfallstoffe, die bereits frühzeitig auf erneuerbaren Kohlenwasserstoffen basierten. Bis 2050 werden in allen Green-Szenarien die energiebedingten Emissionen treibhausgasneutral, siehe Abbildung 5-36.

Die Entwicklung des Sektors Energie aus dem Klimaschutzplan ist im Kapitel 6.1.1.1 dargestellt.

**Abbildung 5-36: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Energie nach der UNFCC-Berichterstattung für alle Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

## 5.2.7 Schlussfolgerungen für die Energieversorgung

Der erforderliche Endenergiebedarf beeinflusst wesentlich die Bedarfe an erneuerbaren Energien, Rohstoffen für die Energieversorgungsanlagen, Energieimportabhängigkeit und Ressourceninanspruchnahme (bspw. Fläche). Darüber hinaus unterstützt die Bedarfsreduktion die Integration der erneuerbaren Energien, entlastet diese und leistet insbesondere im Transformationspfad einen wesentlichen Beitrag zur Treibhausgasminderung. Das Erschließen von Potentialen zur Energieeffizienz und Bedarfsreduktionen über alle Anwendungsbereiche hinweg nimmt daher eine Schlüsselrolle im Transformationspfad hin zu einer treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Energieversorgung ein. In den Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, wird der Endenergiebedarf deutlich gegenüber dem heutigen Niveau reduziert, in GreenSupreme um rund 48 %. Die Auswirkungen geringerer Effizienz, wie in GreenLate, wo nur eine Minderung um knapp 15 % erreicht wird, verursacht höhere Importabhängigkeit (siehe Kapitel 5.2.4), höhere kumulierte Treibhausgasemissionen (siehe Kapitel 6.1) und höheren Rohstoffaufwendungen (siehe Kapitel 6.2). Daher ist ein



ambitioniertes Vorgehen bei zur Reduktion des Energiebedarfes durch folgende Maßnahmen erforderlich:

- ▶ In sämtlichen Anwendungsbereichen sind ambitionierte und schnelle Maßnahmen zur Energieeffizienz zu ergreifen. Dabei sind sowohl ordnungsrechtliche Instrumente zum Setzen von Standards als auch Förderprogramme für effiziente Techniken und Kontrolle von Energiemanagement zu ergreifen.
- ▶ Im alltäglichen Handeln jedes Einzelnen muss ein stärkeres Bewusstsein für die eigene Verantwortung geschaffen werden, um den Konsum von Energie nachhaltig zu reduzieren.
- ▶ Rohstoffarme effiziente Energietechniken müssen eingeführt werden.

Sektorkopplung ist zentraler Baustein für das Gelingen einer treibhausgasneutralen Energieversorgung. Bei der Integration neuer Stromverbraucher, also Sektorkopplungstechniken, die mittels erneuerbarem Strom eine treibhausgasneutrale Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung ermöglichen, ist von Beginn an auf Effizienz und Effektivität zu achten. Eine effiziente Sektorkopplung, bei der dort, wo technisch möglich auch Strom direkt zum Einsatz kommt, entlastet den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Importabhängigkeit und die Rohstoffbedarfe. Beim Vergleich der Nettostromerzeugung von GreenSupreme mit aufgerundet 850 TWh zu rund 2700 TWh in GreenLate wird das Ausmaß einer „Eins-zu-Eins“-Substitution und Festhalten an konventionellen Techniken deutlich. Daher sind zur Integration von Sektorkopplungstechniken folgende Schritte erforderlich:

- ▶ Die klimafreundliche Integration von PtX-Techniken sollte entsprechend ihres Substitutionspotentials und der effektiven Treibhausgasminderung oberste Prämisse sein. Hierfür sind jetzt effiziente Techniken, wie Elektromobilität und Wärmepumpen, in einem breiten Mix an Instrumenten zu fördern und anzureizen.
- ▶ Die Rahmenbedingungen, wie die Abgaben (inkl. CO<sub>2</sub>-Bepreisung), Umlagen und Steuern müssen schnell so gestaltet werden, dass effiziente PtX-Techniken insbesondere gegenüber fossilen aber auch ineffizienten PtX-Techniken kostengünstiger sind. Nur so kann auch der gesamtsystemische Beitrag zur Energiebedarfsreduktion und Ressourcenschonung gehoben werden.
- ▶ In der Raumwärmeversorgung sollte vor dem Hintergrund der Vielzahl erneuerbarer Alternativen keine Integration von PtG in der dezentralen Wärmeversorgung erfolgen und auch nicht gefördert werden, siehe Kapitel 5.3.

Der vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische und nicht-energetische Anwendungen ist sowohl aus Klima- als auch aus Ressourcenschutzperspektive unabdingbar. Ein Festhalten an fossilen Energien führt dauerhaft zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre und dauerhaft steigender Primärrohstoffinanspruchnahme. Für ein schnelles Handeln hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung sind folgende Schritte erforderlich:

- ▶ Der technisch mögliche, vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger sollte erklärtes Ziel für spätestens 2050 werden.

- ▶ Die Rahmenbedingungen müssen über alle Anwendungen hinweg so gestaltet werden, dass die Nutzung fossiler Energieträger vor dem Hintergrund der resultierenden Klima- und Umweltkosten mittel- und langfristig nicht wirtschaftlich ist. Dabei sind zeitnah die politischen Weichen so zu stellen, dass frühzeitig der mittelfristige Innovations- und Entwicklungsrahmen festgelegt und Planungssicherheit geschaffen wird. Auch, um frühzeitig die noch erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, insbesondere bei den Prozesstechniken initiieren zu können.
- ▶ Der Ausstieg aus der Kohleverstromung muss schnell umgesetzt werden, um einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der kumulierten Emissionen in der Atmosphäre zu leisten und damit unseren internationalen Verpflichtungen gerecht zu werden. Der Kohleausstieg sollte einhergehen mit einem zügigen Strukturwandel in den betroffenen Regionen, der dabei regionalwirtschaftliche Alternativen erschließt und soziale Härten abfedert.
- ▶ Der Ausstieg aus der Kohleverstromung muss schnell ausgeweitet werden auf einen Ausstieg aus der Kohlenutzung insgesamt. Hier sollten, insbesondere in der Industrie, schnellstmöglich die Forschungen und Entwicklungen in alternative Verfahren intensiviert und die Ergebnisse durch entsprechende Förder- und Rahmenbedingungen schnell in den Markt integriert werden.
- ▶ Der Ausstieg aus der fossilen Wasserstoffwirtschaft ist durch Pilotprojekte von PtG-Wasserstoffanlagen zeitnah vorzubereiten, so dass in der Dekade nach 2030 die Integration von PtG-Wasserstoff-Anlagen erfolgen kann.
- ▶ Der Ausstieg aus der Mineral- und Erdölnutzung in der chemischen Industrie ist mit Forschungs- und Entwicklungsprojekten schnellstmöglich anzugehen. Insbesondere sind relevante Produktionsprozesse von langlebigen Produkten in der chemischen Industrie zu adressieren, deren letzte Verwertung mit dem Freisetzen von Treibhausgasemissionen verbunden ist und diese erst am Ende einer Kaskadennutzung nach 2050 erfolgen würde.
- ▶ Mit obenstehenden erforderlichen Schritten bei der Integration von effizienten PtX-Techniken in den Anwendungsbereichen wird der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger unterstützt. Die zeitnahe verstärkte Integration der Elektromobilität und von Wärmepumpen mit besonders hohen Wirkungsgraden gegenüber konventionellen Techniken, können einen effektiven Beitrag zum Klimaschutz und zur Reduktion der fossilen Brenn- und Kraftstoffnutzung in den nächsten Jahren leisten.

Der Ausbau erneuerbarer Energien hin zu einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung ist aus Klimaschutzperspektive unabdingbar. Bereits 2030 basieren die Green-Szenarien zu mindestens 70 % auf erneuerbaren Energien in der Strombesorgung. In Abhängigkeit der Sektorkopplung, dem Erschließen von Energieeffizienz- und -vermeidungspotentialen sowie dem Ausstieg aus der fossilen Energiewirtschaft sind unterschiedliche Herausforderungen und Ausbauraten zu meistern. So werden in GreenLate bis 2050 151 GW Windenergie an Land und 218 GW Photovoltaik und im Gegensatz dazu in GreenSupreme nur 127 GW Windenergie an Land und 131 GW Photovoltaik benötigt. Dabei ist vor dem Hintergrund des Ressourcenschutzes gleichfalls der Rohstoffbedarf der Techniken beim

Ausbau und globale Übertragbarkeit zu bedenken. Aus den Ergebnissen der Green-Szenarien ergeben sich hierfür folgende Schritte:

- ▶ Windenergie an Land wird künftig zur tragenden Säule der Stromversorgung in Deutschland. Der jährliche Bruttozubau von Windenergie an Land ist auf mindestens 4 GW pro Jahr und vorzugsweise auf 5,5 GW pro Jahr zu erhöhen. Ein besonders ambitionierter und frühzeitiger Ausbau ist deshalb notwendig, um die menschenverursachten kumulierten Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre möglichst gering zu halten.
- ▶ Der sich abzeichnende Flächenengpass zur tatsächlich nutzbaren Fläche für die Windenergie durch höhere Ausweisungsziele in den Ländern und Regionen ist schnell zu beheben, um die Erreichung der Klimaschutzziele mittelfristig zu gewährleisten.
- ▶ Der jährliche Bruttozubau der Photovoltaik ist auf mindestens 3,5 GW pro Jahr zu erhöhen. Um den Zielen des Pariser Übereinkommens zu entsprechen, wäre ein Ausbau von mindestens 4,8 GW pro Jahr erforderlich.
- ▶ Windenergie auf See bietet wegen der stetigen und stärkeren Windverhältnisse, höheren Stromerträge bei gleicher installierter Leistung und höherer Akzeptanz sehr gute Voraussetzungen, langfristig eine noch entscheidendere Rolle als in den Green Szenarien dargestellt einzunehmen. Hierfür müssten aufgrund der langen Planungszeiträume schon heute entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.
- ▶ Es sind möglichst stetige Ausbaupfade der erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung des Rückbaus und der Entwicklungen beim Stromverbrauch anzustreben. Abrupte politische Kursänderungen sind zu vermeiden.
- ▶ Trotz Ausstieg aus der fossilen und atomaren Energieversorgung ist eine Energieversorgung ohne Anbaubiomasse nach 2030 möglich, was eine Entlastung der begrenzten Ressourcen Boden, Wasser, Phosphor, etc. bedeuten würde. Entsprechend sollte die Bioenergieförderung angepasst und eine Abkehr von der energetischen Anbaubiomassenutzung erfolgen. Der Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse ist mittelfristig zu erfolgen, um Umwelt, Natur und Biodiversität zu stärken. Die energetische Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen sollte hingegen gestärkt werden, wenn keine negativen, sondern, wie bei der Vergärung von Gülle, positive Nebeneffekte zu erwarten sind.

Eine vollständige auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung in Deutschland gelingt vor allem dann, wenn global ein gemeinschaftliches, ambitioniertes Verständnis zum Klima- und Ressourcenschutz besteht. Insbesondere mit Blick auf die begrenzten kostengünstigen Standorte erneuerbarer Energien in Deutschland, wird auch zukünftig ein Großteil der treibhausgasneutralen Brenn-, Kraft- und Rohstoffe importiert. Sollen große Strukturbrüche in den globalen Energiemärkten vermieden werden, muss eine Transformation der globalen Energiemärkte von heute fossil, hin zu treibhausgasneutralen Energiemärkten erfolgen. In den Green-Szenarien reduziert sich die Importabhängigkeit von heute 70 % auf 65 % in GreenLate und bis zu 50 % in GreenSupreme. Bereits 2030 werden in allen Green-Szenarien erneuerbare Energieträger benötigt. Sollten weniger Effizienzpotentiale gehoben werden oder weniger auf effiziente Sektorkopplung und eher auf eins-zu-eins-Substitution

gesetzt werden, ist umso ambitioniertes Handeln umso früher notwendig. Für die Umsetzung sind folgende Maßnahmen erforderlich:

- ▶ Deutschland sollte schnell international und europäisch darauf hinwirken, dass auch andere Staaten bis spätestens 2050 treibhausgasneutral werden.
- ▶ Deutschland sollte schnell verstärkt nachhaltige Kooperationen mit anderen Staaten zu Forschung, Entwicklung, Wissenstransfer und Umsetzung zur PtG/PtL-Produktion aufbauen. Frühzeitig bedarf es global günstiger Standorte für den Ausbau erneuerbarer Energien und der Produktion von erneuerbaren strombasierten Brenn-, Kraft- und Rohstoffen. Dabei sind die Aspekte des Umwelt- und Ressourcenschutzes sowie der gleichberechtigten Partnerschaft wichtige Leitlinien. Bedingung für die Ausgestaltung zwischenstaatlicher Kooperationen sollte es auch sein, die an den Produktionsstandorten erforderliche vollständige Transformation des heimischen Energiesystems vorrangig zu fördern.

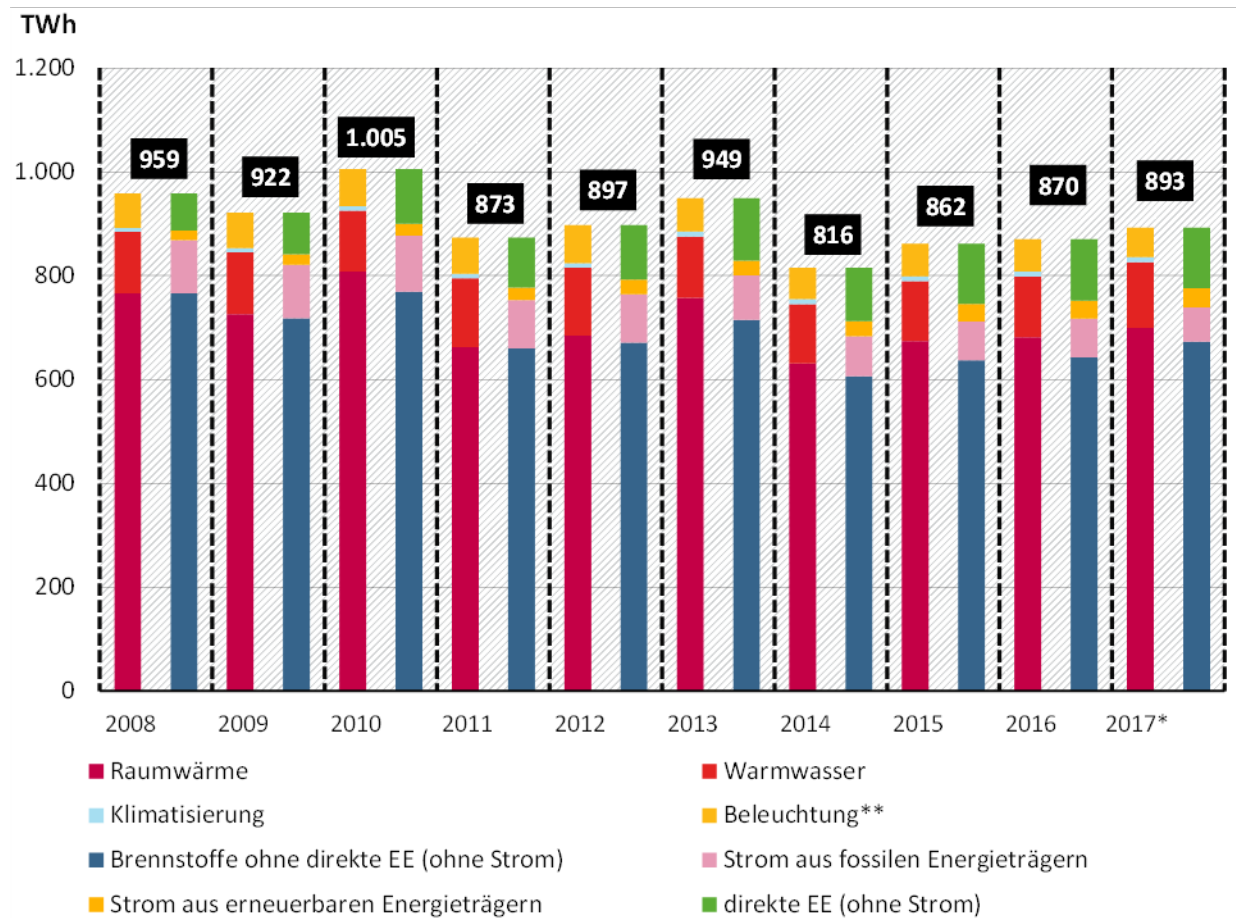


## 5.3 Bauen und Wohnen

### 5.3.1 Einleitung

Gebäude prägen über ihre architektonische Gestaltung und ihre funktionale Bauweise unseren Alltag sowohl im Beruf als auch in der Freizeit. Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels, der gesellschaftlich veränderten Anforderungen bspw. bei Konsum, Urbanisierung, Mobilität oder der Digitalisierung, werden stetig Gebäude modernisiert, saniert und neugebaut. Der Um- und Ausbau von Verkehrswegen, Energieinfrastrukturen, Wasser- und Abwasserversorgung unterliegt gleichfalls einen stetigen Wandel, der sowohl den gesellschaftlichen als technischen Anforderungen unterliegt. Bauen und Wohnen ist daher schon immer einem ständigen Wandel unterlegen, der den Ansprüchen der Gesellschaft gerecht wird. Hinzukommen die Erfordernisse die Treibhausgasemissionen und die Ressourceninanspruchnahme zu reduzieren sowie den Auswirkungen des Klimawandels entgegen zu treten.

Der Endenergieverbrauch (EEV) in Gebäuden reduzierte sich seit 2008 von 959 TWh bis 2017 durchschnittlich jährlich um 0,7 % oder insgesamt um 66 TWh, wie in Abbildung 5-37 zu sehen ist. Maßgeblich für diese Entwicklung war der Rückgang des EEV für Raumwärme um 67 TWh, während die Verbräuche für Warmwasser und Klimatisierung stiegen. Ziel der Bundesregierung ist eine Reduktion des Bedarfs nicht-erneuerbarer Primärenergie bis 2020 um 20 % und bis 2050 um 80 % gegenüber 2008 auf etwa 243 TWh. Der Anteil direkt genutzter, erneuerbarer Energien inklusive Strom aus erneuerbaren Energien lag 2017 bei 17,3 %. Temperaturbereinigt sank im Sektor private Haushalte der Endenergieverbrauch für Raumwärme pro Quadratmeter bewohnter Wohnfläche auf 133 kWh/m<sup>2</sup>. Die gebäuderelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachten insgesamt rund 27,9 % aller verbrennungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2017 und sind gegenüber 2008 um 17,7 % auf 208 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> gesunken.

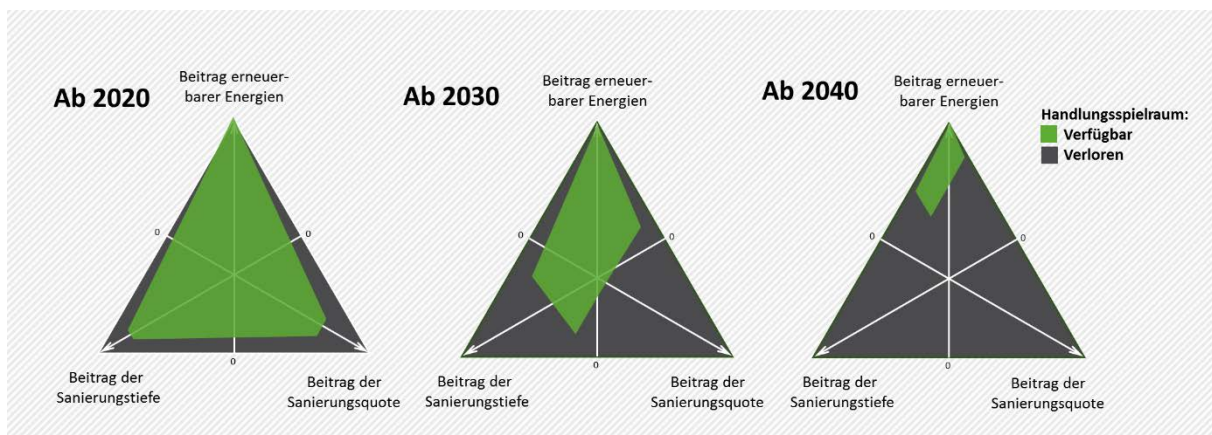
**Abbildung 5-37: Entwicklung des Endenergieverbrauchs in Gebäuden**

Hinweise: \* vorläufige Angaben; \*\* nur fest installierte Beleuchtung der Sektoren Industrie und GHD

Quelle: UBA Berechnungen auf der Basis von (AGEB, 2019; BMWi, 2019b)

Die Techniken für die Vermeidung der energiebedingten Treibhausgasemissionen des Gebäudebestandes sind im Markt eingeführt und verfügbar. Die Effizienzpotentiale können technisch gehoben und der verbleibende Energiebedarf durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Wegen der unterschiedlichen Interessen der bei der energetischen Gestaltung der Gebäude involvierten Akteure sowie der langen Modernisierungs- und Erneuerungszyklen, ist die konsequente und rasche Umsetzung von wirksamen Maßnahmen zur Treibhausminderung im Gebäudesektor eine Herausforderung. Dabei ist auch schnelles Handeln bei der Verbesserung der rechtlichen, ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen erforderlich. Der mögliche Lösungsraum für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand bewegt sich im Spannungsfeld zwischen den Beiträgen der Sanierungsquote (Häufigkeit von Sanierungen), der Sanierungstiefe (Effekt einer Sanierung) und dem Bedarf an erneuerbaren Energien, wie in Abbildung 5-38 qualitativ veranschaulicht wird. Der Lösungsraum (grüne Fläche) für hier 2050 ändert sich mit dem Jahr der Einführung der politischen Instrumente und wird durch verzögertes Handeln immer kleiner. Bei frühzeitig startenden Energieeffizienzmaßnahmen ist beispielsweise weniger Wärme aus erneuerbaren Energien notwendig. Werden Energieeffizienzmaßnahmen nicht zeitnah oder im geringeren Maße umgesetzt, muss mehr Endenergie an erneuerbaren Energien für die Gebäude nachhaltig zur Verfügung gestellt werden (UBA, Veröffentlichung in Planung-a). Grund ist u. a. die sich erst langsam entfaltende Klimaschutzwirkung nach Einführung der Instrumente.

**Abbildung 5-38: Qualitative Darstellung des Lösungsraumes für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand im Jahr 2050, abhängig vom Start der politischen Instrumente**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (UBA, Veröffentlichung in Planung-a)

Auch bei dieser Transformation ist der Ressourcenbedarf mit in den Blick zu nehmen. Ähnlich wie in Kapitel 5.2 bereits dargestellt, ist mit der Umstellung auf erneuerbare Energien eine vollständige Vermeidung der Treibhausgasemissionen möglich. Die Primärrohstoffanspruchnahme kann jedoch nach heutigem Kenntnisstand nicht vollständig vermieden werden. Die Wahl der Techniken und Materialien für Gebäude, sowohl im Neubau als auch bei Sanierungen bestimmen maßgeblich den Umfang der Rohstoffanspruchnahme und die jeweils erforderlichen Rohstoffe. Gleichfalls beeinflussen den Rohstoffaufwand die erforderlichen Um- und Ausbaubedarfe von Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen, welche maßgeblich auch die Entwicklung der Flächenneuinanspruchnahme beeinflussen, insbesondere mit Blick auf die Neuversiegelung.

Die Gestaltung der Green-Szenarien soll den unterschiedlichen Möglichkeiten zur Transformation gerecht werden. In Tabelle 5-11 wird ein Überblick gegeben, wie die Charakteristiken der Green-Szenarien im Bereich Bauen und Wohnen angelegt sind.

**Tabelle 5-11: Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Bauen und Wohnen**

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Mittlere Sanierungsrate pro Jahr	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Mittleres Zielniveau von Sanierungen	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Wohnfläche pro Kopf	steigt zunächst an	steigt kontinuierlich	steigt zunächst an	nimmt langfristig ab	nimmt langfristig ab
Verhältnis EFH/ZFH zu MFH	konstant	konstant	konstant	höherer Anteil MFH	höherer Anteil MFH
Anteil der leitungsgebundenen Wärmeversorgung	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch
Anteil Neubau in Holzbauweise	steigt	konstant	steigt stark	steigt	steigt stark

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Zusammensetzung Dämmstoffe (ggü. heute)	unverändert	unverändert	verändert	unverändert	Verändert

### 5.3.2 Flächenneuanspruchnahme

In Deutschland werden aktuell anhaltend neue Flächen für Wohnen, Arbeit, Freizeit und Mobilität belegt. Nach Angaben des Statistischen Bundesamts hat sich die Siedlungs- und Verkehrsfläche von 2010 bis 2017 von 47.702 auf 49.505 km<sup>2</sup> ausgedehnt. Dabei dehnte sich die Siedlungsfläche um rund 10,8 % und die Verkehrsfläche um 9,7 % aus (Statistisches Bundesamt, 2010, 2017b). Circa die Hälfte der Siedlungs- und Verkehrsflächen ist dabei versiegelt, das heißt mit Gebäuden oder Anlagen bebaut oder für Verkehrsinfrastrukturen asphaltiert, betoniert, gepflastert verdichtet oder anderweitig befestigt. Die Böden verlieren dadurch nicht nur ihre ökologische Funktion zur Aufnahme und Speicherung von Niederschlägen, sondern auch ihre Funktionen für das Kleinklima insbesondere im städtischen Raum. Die Versiegelung von Böden zerstört zudem die natürliche Bodenfruchtbarkeit, die sich erst in langen Zeiträumen wiederherstellen lässt. Es ist somit deutlich, dass die Entwicklung im Hoch- und Tiefbau eng mit der Frage nach dem zusätzlichen Bedarf an der natürlichen Ressource Fläche, ausgedrückt in der Neuanspruchnahme von Siedlungs- und Verkehrsflächen (Flächenverbrauch) verbunden ist. Zusätzlich entsteht über den Bedarf an Verkehrsinfrastruktur und Fläche ein nicht unerheblicher Bedarf an Rohstoffen (siehe Kapitel 5.3.5).

Auch aus diesem Grund hat die Bundesregierung das Ziel formuliert den Flächenverbrauch, d. h. die Flächenneuanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsfläche bis 2030 auf unter 30 Hektar pro Jahr zu reduzieren (Bundesregierung, 2018a). Das Integrierte Umweltprogramm (BMU, 2016a) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sieht gar eine Reduktion auf 20 ha/Tag bis 2030 und langfristig den Übergang zu einer Flächenkreislaufwirtschaft, d. h. netto keine Flächenneuanspruchnahme, vor. Dies wurde von der Bundesregierung auch mit dem Klimaschutzplan bis 2050 als Ziel festgelegt (BMU, 2016b). Diese Ziele eines flächensparenden Bauens müssen in allen Szenarien berücksichtigt werden, um die Transformation zu einer weitestgehend treibhausgasneutralen Gesellschaft auch mit Blick auf den zusätzlichen Bedarf an der natürlichen Ressource Fläche schonend und effizient zu gestalten. Daher wird für alle Szenarien angenommen, dass durch zielgerichtete planerische und ökonomische Maßnahmen (beispielsweise einen Handel mit Flächenzertifikaten<sup>56</sup>)- und einer stringenten Raumordnung bis 2020 die Flächenneuanspruchnahme auf 30 ha/Tag reduziert werden kann.

<sup>56</sup> Weitere Vorschläge siehe auch (UBA, 2019h).



**Tabelle 5-12: Entwicklung der Flächenneuanspruchnahme (netto) in den Szenarien**

in ha/Tag	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2020	30	30	30	30	30
2030	20	20	20	10	10
2040	10	10	10	5	5
2050	0	0	0	0	0

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

In GreenLife und GreenSupreme führen die angenommene Entwicklung der Wohnfläche und die etwas stärkere Verdichtung zu einem verringerten Bedarf an zusätzlicher Siedlungs- und Verkehrsfläche. Unter anderem hierdurch kann die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis 2030 auf 10 ha/Tag reduziert werden. In den weiteren Szenarien wird bis 2030 eine Reduktion auf 20 ha/Tag umgesetzt. Ergänzt durch eine zunehmende Flächenkreislaufwirtschaft wird angestrebt, dass in allen Szenarien bis 2050 netto keine weitere Flächenneuanspruchnahme mehr stattfindet, siehe Tabelle 5-12.

### 5.3.3 Entwicklung des Gebäudebestandes

#### 5.3.3.1 Gebäudeflächenentwicklung

Die beheizte Gebäudefläche, insbesondere die Wohnfläche und ihre Entwicklung im Zeitverlauf ist sowohl aus Klima- als auch Ressourcenschutzbetrachtungen eine relevante Größe. Sie bestimmt neben anderen Parametern den Wärmebedarf im Gebäudebereich. Die individuelle Nachfrage nach Wohnfläche in Verbindung mit der demographischen Entwicklung ist zudem ausschlaggebend sowohl für die Neubaurate- als auch Abgangsrate<sup>57</sup> bei Wohngebäuden. Diese wiederum haben relevante Auswirkungen für den Bedarf an Baustoffen im Hoch- und Tiefbau und die Flächenneuanspruchnahme (siehe Kapitel 5.3.2).

#### Wohnflächenentwicklung

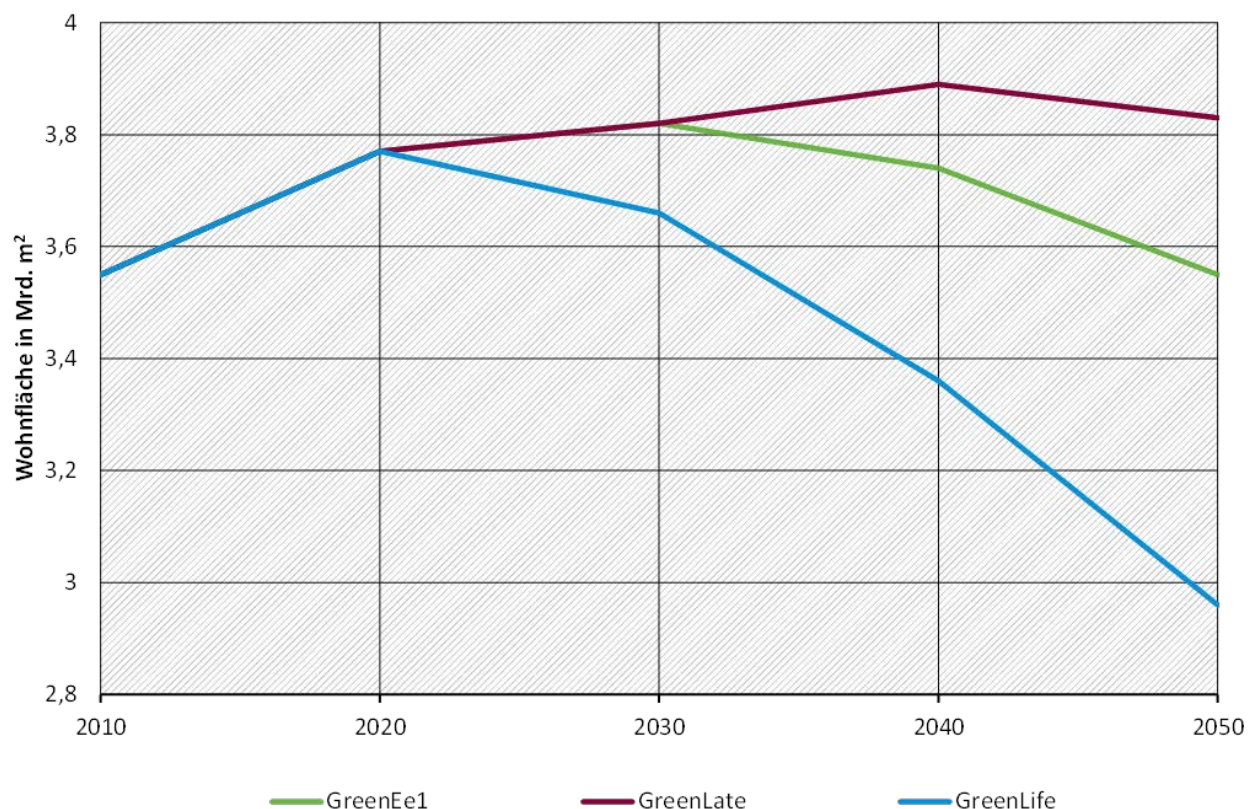
In den letzten Jahren ist eine kontinuierliche Zunahme der bewohnten Wohnfläche zu verzeichnen. Während im Jahr 2010 ca. 3,68 Mrd. m<sup>2</sup> Wohnfläche in Wohn- und Nichtwohngebäuden im Bestand waren, betrug diese 2017 bereits 3,85 Mrd. m<sup>2</sup> (Statistisches Bundesamt, 2019c). Die Zunahme der bewohnten Wohnfläche erfolgte fast ausschließlich im Bestand der Wohngebäude, wohingegen die Wohnfläche in Nichtwohngebäuden mit 170 Mio. m<sup>2</sup> nahezu konstant blieb (Statistisches Bundesamt, 2019c). Aus diesem Grund wird nachfolgend die Entwicklung der Wohnflächen lediglich für bewohnte Wohnungen in Wohngebäuden betrachtet. Wegen fehlender bundesweiter Daten zu nicht beheizten aber bewohnten Wohnflächen (z. B. Wintergärten, Balkone) wird vereinfachend die bewohnte der beheizten Wohnfläche gleichgesetzt und nachfolgend als Wohnfläche bezeichnet. Sofern relevant, beispielsweise für Rohstoffbedarfe zur Instandhaltung und um einen funktionierenden Wohnungsmarkt unterstellen zu können, wird in einzelnen Berechnungen der Green-Szenarien ein konstanter Wohnungsleerstand von 5 % angenommen (in Anlehnung an (Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015))<sup>58</sup>.

<sup>57</sup> Der Abgang umfasst Rückbau/Abriss sowie den neuen unbeheizten Leerstand.

<sup>58</sup> Das heißt die Höhe des neuen Wohnungsleerstand (enthalten in der Abgangsrate) entspricht der Höhe des ehemaligen Leerstands, der im entsprechenden Jahr wieder bewohnt wird.

Die Wohnfläche in Wohngebäuden lag im Jahr 2010 bei rund 3,55 Mrd. m<sup>2</sup> und hat bis zum Jahr 2017 auf 3,72 Mrd. m<sup>2</sup> zugenommen. Diese Entwicklung wird sich ohne spezifische Maßnahmen zur Trendumkehr nach Einschätzung verschiedener Studien (vgl. z. B. (Prognos AG et al., 2014)) mindestens bis 2025 weiter fortführen. Dabei wurden mit den Green-Szenarien vergleichbare Bevölkerungsentwicklungen in den Studien unterstellt. Daher wird in allen Green-Szenarien zunächst von einem weiteren Anstieg der bewohnten Wohnfläche bis 2030 ausgegangen, jedoch entsprechend der Szenariocharakteristika in unterschiedlicher Höhe. Ebenso variiert die Entwicklung der Wohnfläche im weiteren Verlauf bis 2050 entsprechend der jeweiligen Szenariocharakteristika (Abbildung 5-39).

**Abbildung 5-39: Entwicklung der absoluten bewohnten Wohnfläche im Vergleich**



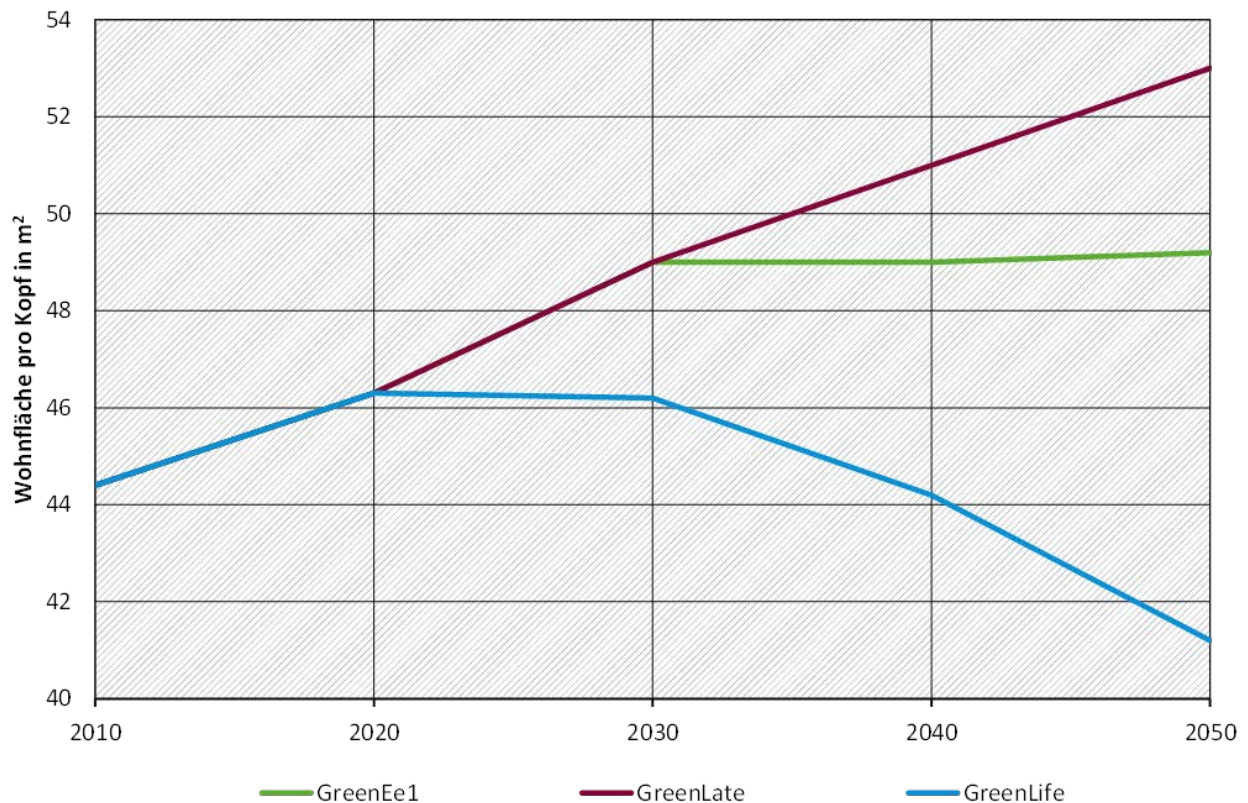
Hinweis: Die Entwicklung in GreenEe1 wird identisch in GreenEe2 und GreenMe und die Entwicklung in GreenLife identisch in GreenSupreme unterstellt.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe folgt die Entwicklung der Wohnfläche bis 2030 den Trendannahmen aus (BBSR, 2015) angepasst auf die aktuelle Entwicklung. So werden im Jahr 2030 rund 3,82 Mrd. m<sup>2</sup> Wohnfläche unterstellt. Für die Zeit nach 2030 wird entsprechend des in (Prognos AG et al., 2014) beschriebenen Trends die Wohnflächenentwicklung bis 2050 angenommen. Dies bedeutet einen bis 2040 zunächst langsamen und dann stärkeren Rückgang der Wohnfläche, um im Ergebnis für 2050 wieder die Wohnfläche von 2010 zu erreichen. Entsprechend liegt ab 2030 die Abgangsrate zunächst leicht, dann deutlich über der Neubaurate in diesen Szenarien. In GreenLate wird analog zu (UBA, 2016f) insgesamt eine Zunahme der bewohnten Wohnfläche bis zum Jahr 2050 um rund 7,5 % im Vergleich zu 2010 auf 3,83 Mrd. m<sup>2</sup> angenommen, wobei im Jahr 2040 mit 3,89 Mrd. m<sup>2</sup> bewohnter Wohnfläche ein Maximum erreicht wird. Somit übersteigt in GreenLate erst ab 2040 die Abgangsrate die Neubaurate leicht. In GreenLife und GreenSupreme kann entsprechend der

Szenariocharakteristik des umweltbewussten Verhaltens und Konsums eine Reduktion der bewohnten Wohnfläche im Jahr 2050 auf 2,96 Mrd. m<sup>2</sup> erreicht werden. Hierzu zählen unter anderem ein höherer Anteil an Mehrfamilienhäusern und eine modulare Bauweise (vgl. auch Kapitel 5.3.3.2). Die Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche zeigt aufgrund der unterstellten Bevölkerungsentwicklung einen leicht anderen Verlauf (Abbildung 5-40).

**Abbildung 5-40: Entwicklung der Pro-Kopf-Wohnfläche der Szenarien im Vergleich**



Hinweis: Die Entwicklung in GreenEe1 wird identisch in GreenEe2 und GreenMe und die Entwicklung in GreenLife identisch in GreenSupreme unterstellt.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Während in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe die Pro-Kopf-Wohnfläche ab 2030 mit 49 m<sup>2</sup>/Kopf nahezu konstant bleibt, steigt diese in GreenLate bis zum Jahr 2050 auf 53 m<sup>2</sup>/Kopf an. Aufgrund der in GreenLife und GreenSupreme unterstellten modularen Bauweise, der Verstetigung neuer Wohnkonzepte (wie etwa Mehr-Generationen-Wohnen und gemeinschaftliches Wohnen im Alter, Wohnungstauschbörsen) sowie dem Umbau von Bestandswohnungen in kleinere Wohneinheiten, auch in ländlicheren Regionen (vgl. auch (Blum & Gutting, 2017/2018)) sinkt hier die Pro-Kopf-Wohnfläche ab 2030 von 46,2 m<sup>2</sup> auf 41,2 m<sup>2</sup> in 2050.

### Nichtwohngebäude

Auf Basis von (Bettgenhäuser et al., 2019) wurde für die Nichtwohngebäudefläche unterstellt, dass diese von ca. 2,28 Mrd. m<sup>2</sup> im Jahr 2011 auf 2,54 Mrd. m<sup>2</sup> in 2050 steigt. Aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit zur belastbaren Variation der Entwicklung der Nichtwohngebäude wurde diese in den Green-Szenarien nicht verändert. Tabelle 5-13 zeigt die wesentlichen Parameter der Szenarien zur Entwicklung der Gebäudeflächen in der Zusammenschau.



**Tabelle 5-13: Entwicklung der Gebäudeflächen in den Szenarien bis 2050**

		GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
wohnte Wohnfläche pro Person [m²]		49,4	53,0	49,4	41,2	
Wohnfläche absolut in 2050 [Mrd. m²]		3,55	3,83	3,55	2,96	
Nutzfläche Nichtwohngebäude [Mrd. m²]		2,54				
Abgangsrate (% Wohnfläche pro Jahr)	bis 2020	0,09				
	bis 2030	0,56			1	
	bis 2040	0,72	0,31	0,72	1,35	
	bis 2050	0,91	0,56	0,91	1,6	
Neubaurate (% der Wohnfläche pro Jahr)	bis 2020	0,7				
	bis 2030	0,7				
	bis 2040	0,5				
	bis 2050	0,4				

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.3.3.2 Neubau

Wenn gleich der Anteil der Wohnfläche nach 2011 an neu gebauten Wohnungen am Wohngebäudebestand 2050 eher gering ist, ist dieser sowohl aus Klimaschutzperspektive wie auch mit Blick auf die Rohstoffanspruchnahme nicht zu vernachlässigen. Entsprechend der Wohnflächenentwicklung absolut und pro Kopf und den Szenariocharakteristiken folgend ergeben sich für die Szenarien gleiche Neubauraten aber deutlich unterschiedliche Abgangsrate (Tabelle 5-13). Dabei sind wie bei der Wohnflächenentwicklung die Szenarien GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe gleich, ebenso entsprechen GreenLife und GreenSupreme einander. GreenLate weist ab 2030 die geringste Abgangsrate der Szenarien auf. Dies führt unter anderem auch dazu, dass ein geringerer Abriss von tendenziell mit Bezug auf das Dämmniveau eher schlechten Bestandsgebäuden erfolgt.

Tendenziell kann davon ausgegangen werden, dass in Mehrfamilienhäusern und großen Mehrfamilienhäusern (MFH und GMH) Wohnungen mit geringeren Pro-Kopf-Wohnflächen zugebaut werden als in Ein- und Zweifamilienhäusern und Reihenhäusern (im Folgenden kurz EFH und RH). Ein höherer Anteil an Mehrfamilienhäusern hat den weiteren positiven Effekt, dass der spezifische Raumwärmeverbrauch bei gleichen Dämmstärken in Mehrfamilienhäusern aufgrund des typischerweise günstigeren Oberfläche- zu Volumenverhältnis etwas niedriger als in Einfamilienhäusern ist. Daher liegt es nahe, insbesondere in den beiden Szenarien mit abnehmender Pro-Kopf-Wohnfläche eine Anpassung des Verhältnisses von Ein- und Zweifamilienhäusern zu Mehrfamilienhäusern bei Neubauten zu variieren.



Der aktuelle Trend im Neubau liegt bei einem Flächenverhältnis in neugebauten Ein- und Zweifamilienhäusern zu Mehrfamilienhäusern von ca. 60 % zu 40 %. Für die die Mehrzahl der Szenarien wird angenommen, dass dieser Trend sich mit einem Verhältnis von 66 % zu 34 % fortsetzt. Für GreenLife und GreenSupreme wird jedoch eine Trendumkehr angenommen, so dass ab 2040 ein Verhältnis EFH/RH zu MFH/GMH von 27 % zu 73 % im Neubau unterstellt wird, siehe auch Tabelle 5-14.

**Tabelle 5-14: Entwicklung des Anteils der Wohnfläche in unterschiedlichen Gebäudetypen im Neubau für GreenEe1 und GreenLife**

Anteil am Neubau in %	2011-2020		2021-2030		2031-2040		2041-2050	
	Green Ee1	Green Life	Green Ee1	Green Life	Green Ee1	Green life	Green Ee1	Green Life
Einfamilien- haus	33	33	33	10	33	10	33	10
Reihenhaus	33	33	33	24	33	17	33	17
Mehrfamilien- haus	17	17	17	33	17	36,5	17	36,5
Großes Mehrfamilien- haus	17	17	17	33	17	36,5	17	36,5

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Wesentliche Grundlage für die Annahmen im Hochbau, insbesondere zum Materialeinsatz und Sekundärrohstoffanteilen, bildet die Studie von Deilmann, Krauß und Gruhler (2014). Grundlage für GreenLate bildet die, entsprechend der szenariospezifischen Annahmen zur Wohnflächenentwicklung und energetischen Sanierung angepasste, Sensitivitätsstudie „Business as usual (BAU)“. So wird in GreenLate die aktuelle Materialzusammensetzung im Hochbau bis 2050 fortgeschrieben und von unveränderten Rezyklatquoten ausgegangen (vgl. Tabelle 5-15).

Für GreenEe1, GreenEe2 und GreenLife wird auf die (Deilmann et al., 2014) beschriebene Sensitivitätsstudie „Nachhaltigkeit und Recycling (NA-RC)“ zurückgegriffen, angepasst auf die jeweiligen szenariospezifischen Annahmen zur Wohnflächenentwicklung und energetischen Sanierung. In dieser Sensitivitätsstudie wird u. a. ein deutlich erhöhter Anteil von Wohngebäuden in Holzbauweise und erhöhte Rezyklatquoten angenommen (vgl. Tabelle 5-15 und Tabelle 5-16). Zusätzlich wird angenommen, dass bei Betonbauteilen durch neue Rezepturen und Bewehrungstechnologien Materialeinsparungen von bis zu 10 % erreicht werden können.

Aufbauend auf GreenEe1 erfolgen in GreenMe und GreenSupreme entsprechend der Szenariocharakteristika weitere Anpassungen gegenüber der Sensitivitätsstudie „Nachhaltigkeit und Recycling (NA-RC)“ im Hochbau. Eine wesentliche Anpassung besteht in der weiteren Erhöhung des Anteils an Gebäuden in Holzbauweise. Während in GreenEe1, GreenEe2 und GreenLife unterstellt wird, dass der Holzbauanteil im Wohnungsbau bei Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH) von 15 % in 2010 auf 30 % in 2050 gesteigert werden kann, wird in GreenMe und GreenSupreme der Anteil auf 80 % im Neubau gesteigert. Bei Mehrfamilienhäusern (MFH) steigt der Anteil in diesen beiden Szenarien von 2 % in 2010 auf

45 % in 2050, in den weiteren Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, lediglich auf 15 % in 2050 (vgl. Tabelle 5-16). In GreenLate bleibt der heutige Anteil an Wohngebäuden in Holzbauweise (EFH 15 %/ MFH 2 %) konstant im Neubau erhalten.

**Tabelle 5-15: Exemplarische Recyclinganteile für Hochbauanwendungen in GreenEe1 und GreenLate**

	GreenEe1 2030	GreenEe1 2050	GreenLate 2020-2050
Beton	6	12	0,4
Gipskarton	30	50	0
Ziegel	10	15	0
Holzbauplatten	10	20	4
Mineral. Wärmedämmung	42	56	27

Hinweis: GreenEe1 entspricht auch GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme.

Quelle: Auszug aus Tabelle 25 in (Deilmann et al., 2014)

Ein weiterer relevanter Ansatz zur Materialeinsparung ist die verstärkte Nutzung von alternativen Betonen. Während in allen Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, alternative Bindemittel zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 5.5.6), werden in GreenMe und GreenSupreme zusätzlich Textilbetonen als Substitut für Stahlbeton verwendet. Diese bestehen aus langen Fasermaterialien wie Glas und/oder Carbon und einer fließfähigen Feinbetonmatrix mit einem Größtkorn von 1 mm und können je nach Bauteil und Anwendung erhebliche Einsparpotenziale aufweisen. Es wird daher eine schrittweise Steigerung des Einsatzes von Textilbetonen als Substitut für Stahlbeton bis 2050 auf 20 % angenommen. Dabei werden überwiegend Textilbetone mit alkaliresistentem Glas zur Anwendung gebracht. Langfristig wird davon ausgegangen, dass durch die Entwicklung von Lösungen zur Entsorgung von Carbonfasern ein verlässliches Stoffstrommanagement etabliert werden kann und eine weitere Marktdurchdringung von carbonfaserverstärkten Betonen erfolgt. Daher wird in GreenMe und GreenSupreme ein zunehmender Anteil dieser Betone unterstellt.

Neben dem Holzbauanteil und dem Einsatz von Faserbeton variieren in GreenMe und GreenSupreme weitere Annahmen mit unmittelbarem Bezug zum Rohstoffbedarf gegenüber den anderen Szenarien, die in Tabelle 5-16 zu sehen sind. So zeigen beispielsweise auch die Fenster ein Potenzial zur Materialeinsparung der Gebäudehülle. Daher wird von einem zunehmenden Anteil materialeffizienter Fensterbauweisen (z. B. Dünngläser im Isolierglas als Alternative zur heutigen Dreifachverglasung) bei den auszutauschenden bzw. neu zu installierenden Fenstern ausgegangen. Darüber hinaus erfolgt eine Substitution von Kupferleitungen durch Aluminiumleitungen bei der Neuinstallation, da trotz größerem Kabeldurchmesser bei Aluminiumleitungen, aufgrund der geringeren Leitfähigkeit, Aluminium eine höhere Materialeffizienz als Kupfer aufweist (vgl. (Dittrich et al., 2018)).

**Tabelle 5-16: Szenariospezifische Annahmen im Hochbau für GreenMe und GreenSupreme**

	2030	2040	2050
Anteil Holzbauweise am Neubau EFH/ZFH	40 %	60 %	80 %

	2030	2040	2050
Anteil Holzbauweise am Neubau MFH/GMH	15 %	30 %	45 %
Substitution konv. Stahlbeton durch Faserbeton	10 %	15 %	20 %
davon Anteil Glasfaser	90 %	80 %	65 %
davon Anteil Carbonfaser	10 %	20 %	35 %
Anteil Aluminiumleitungen	20 %	50 %	100 %
Anteil materialeffiziente Fenster	50 %	75 %	100 %
Anteil holzbasierte Dämmmaterialien Wohngebäude	30 %	50 %	70 %
Anteil holzbasierte Dämmmaterialien Nichtwohngebäude	20 %	25 %	30 %
Bedarfsreduktion durch Leichtbausteine	minus 10 % für Baustoffgruppen Ziegel und Kalksandstein		
Recyclingquoten Baustoffe	unverändert gegenüber GreenEe		

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.3.3.3 Sanierung und Modernisierung

Sanierungen und Modernisierungen erfolgen aus unterschiedlichen Interessen heraus, und nicht immer geht dies mit einer energetischen Sanierung und Bedarfsreduzierung einher.

Beispielsweise Renovierungen durch Putzerneuerung an der Außenfassade. Vor dem Hintergrund der längeren Erneuerungs- und Investitionszyklen ist dies jedoch oft eine vertane Chance Synergien zu heben. Es wird in allen Green-Szenarien daher unterstellt, dass die ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen und finanziellen Anreizmechanismen so ausgestaltet werden, dass bis spätestens 2030 keine Renovierungen oder Modernisierungen an der Gebäudehülle und Gebäudebauteilen mehr ohne gleichzeitige energetische Sanierung erfolgen.

Durch eine Kombination aus ordnungsrechtlichen Maßnahmen, Anreiz- und Förderpolitiken sowie Internalisierung der Klimakosten – ggf. durch eine Bepreisung von fossilen CO<sub>2</sub> – wird eine zunehmende Sanierungsaktivität verbunden mit einem hohen Ambitionsniveau bei der Sanierungstiefe in allen Green-Szenarien bewirkt. Konkret sind die Anstrengungen sowohl beim Niveau der Sanierungsrate als auch beim zeitlichen Verlauf in GreenLife und GreenSupreme entsprechend der Szenariencharakteristik am höchsten. GreenLate liegt deutlich hinter diesem Niveau, gleichwohl gegenüber heute auch eine erhebliche Steigerung zu verzeichnen ist.

So steigt die Sanierungsrate von heute 1 % in GreenLate bis 2030 auf 1,7 % und in GreenLife und GreenSupreme bereits auf 2,5 %, siehe Tabelle 5-17. In allen Szenarien außer GreenLate steigt die Sanierungsrate in den folgenden Dekaden stetig an, so dass GreenLife und GreenSupreme zwischen 2040 und 2050 sogar eine fast vervierfachte Sanierungsrate im Vergleich zu heute darstellen. Die energetischen Standards der einzelnen Bauteile und des Gesamtgebäudes sowie eine ambitionierte Entwicklung bei der Integration von Wärmerückgewinnungsanlagen führt in den meisten Gebäuden zu einer Reduktion des Raumwärmebedarf auf das heutige Passivhaus-Niveau. Konkret reduziert sich der mittlere Raumwärmebedarf von heute rund 84 kWh/m<sup>2</sup> auf

rund 24 kWh/m<sup>2</sup> in GreenLife und GreenSupreme.<sup>59</sup> GreenLate liegt mit 42 kWh/m<sup>2</sup> zwar deutlich darüber, stellt dennoch gegenüber heute eine Halbierung dar, siehe Tabelle 5-18.

**Tabelle 5-17: Entwicklung der mittleren Sanierungsraten pro Jahr der Green-Szenarien**

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2030	2,4 %	1,7 %	2,4 %	2,5 %	2,5 %
2040	3,1 %	1,8 %	3,1 %	3,3 %	3,3 %
2050	3,4 %	1,8 %	3,4 %	3,9 %	3,9 %
von heute bis 2050	2,6 %	1,6 %	2,6 %	2,8 %	2,8 %

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

**Tabelle 5-18: Entwicklung des mittleren Raumwärmebedarfs der Green-Szenarien**

in kWh/m <sup>2</sup>	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2030	52,6	61,1	52,6	52,2	52,2
2040	32	48,9	32	30,9	30,9
2050	25,6	42,4	25,6	24,4	24,4

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Materialeitig dominieren kunststoffbasierte (ca. 45 %) und mineralische Dämmstoffe (ca. 50 %) den Markt. Dämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen haben einen Marktanteil von rund 4 %. In allen Szenarien, außer GreenMe und GreenSupreme, wurde diese Zusammensetzung fortgeschrieben, wobei sich aufgrund der Steigerungen der energetischen Sanierungsraten und -tiefen die absolute Menge der verbauten Dämmstoffe erhöht. Im Sinne der Szenariocharakteristika wird in GreenMe und GreenSupreme von einem erhöhten Anteil biotischer Dämmungen, insbesondere holzbasierter Dämmmaterialien, ausgegangen. Es gibt ausreichend technische Lösungen für holzbasierte Dämmungen für Innen- und Außenwände sowie für Dachflächen und Böden, die durchweg erprobt sind. Technische Limitierungen liegen insbesondere bei Perimeterdämmungen vor, und in Fällen, in denen Feuchtigkeit eine Rolle spielt (Perimeterdämmungen stellen etwa 11-13 % der Gesamtdämmung dar). Potenzial für holzbasierte Dämmungen wird hierbei vor allem bei der Verwendung der bisher energetisch genutzten und zukünftig stärker anfallenden Laubholzsortimente gesehen. Diese können nur zum Teil für konstruktive Zwecke genutzt werden und stehen somit für die Nutzung als Dämmmaterial zur Verfügung. So wird angenommen, dass bei Wohngebäuden bis 2050 ein Anteil holzbasierter Dämmungen bei neuen Dämmungen von 70 % erreicht wird, bei Nichtwohngebäuden wird aufgrund der Heterogenität der Gebäudetypen ein geringerer Anteil von maximal 30 % angenommen, siehe auch Tabelle 5-16.

<sup>59</sup> Des Weiteren wird in GreenLife und GreenSupreme davon ausgegangen, dass die Bewohner von tiefsanierten Gebäuden und von neuen Passivhäusern im hohen Maße ein Verständnis für energiebewusstes Wohnen haben und entsprechendes Nutzverhalten leben, so dass der tatsächliche Endenergiebedarf 10 % unter dem technisch Endenergiebedarf liegt.



**TextBox 5-3: Berücksichtigung umweltbewusstes Verhalten auch bei der Wohnungseinrichtung**

In GreenLife und GreenSupreme werden gesellschaftliche Änderungen angenommen, die sich unter anderem im veränderten Nachfrageverhalten nach Konsumgütern ausdrücken können. Möbel und Einrichtungsgegenstände können hierfür sehr gut stellvertretend betrachtet werden, da derzeit sowohl eher als kurzlebig zu betrachtende Produktausführungen und eher hochwertige, reparierbare und langlebige Produktalternativen am Markt vorhanden sind. Dabei ist ebenfalls zu beachten, dass unter den Möbeln und Einrichtungsgegenständen es solche gibt, die bei guter Nutzung „ein Leben und länger“ halten (Antiquitäten) ebenso wie solche, die auch bei pfleglicher Nutzung abgenutzt sind und erneuert werden müssen (Teppiche) oder auch solche, die nach einer bestimmten Nutzungsdauer vor allem aus hygienischen und/oder gesundheitlichen Gründen regelmäßig ausgetauscht werden sollten (Matratzen z. B. nach 10 – 15 Jahren). Bei einigen Produktgruppen kann durch mehr Flexibilität, modularer Aufbau, reparaturgerechtem Design und die Verfügbarkeit von Ersatz bei Teilen mit höherem Verschleiß eine deutliche Verlängerung der Nutzungsdauer erreicht werden.

Im Sinne der Szenariocharakteristika wird in GreenLife und GreenSupreme angenommen, dass die Konsumenten ab 2030 nur noch hochwertige und langlebige bzw. reparierbar designte Güter aus dem Bereich Möbel und Einrichtungsgegenstände kaufen, die mindestens eine doppelt bis maximal eine dreimal so lange Nutzungsdauer aufweisen wie die durchschnittlichen Güter in 2010. Das führt mit Blick auf die Anzahl und Materialinputs zu einer Halbierung bis Drittelung der Nachfrage pro Person. Da die Waren hochwertiger sind, ist gleichzeitig von einem qualitativen Wachstum auszugehen (z. B. entlang des Einkommensanstiegs). Dabei wird grundsätzlich unterstellt, dass die Industrie sich an den Konsumentenwünschen orientiert und entsprechend umstellt.

**5.3.4 Entwicklung der Energiebedarfe und deren Versorgung**

Die Entwicklung und Ausgestaltung der Gebäude, welche in Kapitel 5.3.3 näher beschrieben wurde, sind wichtige Bausteine bei der Umsetzung eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Gebäudebestandes. Sie beeinflussen maßgeblich die erforderlichen Energiebedarfe. Über diese hinaus bestimmt das Verhalten der Gebäudenutzenden die Energiebedarfe. Dies betrifft nicht nur das Heizverhalten<sup>60</sup> sondern auch den Energiebedarf des Kochens, der Automatisierung und Digitalisierung u. ä.. Auch hier prägen die Charakteristiken der Green-Szenarien die einzelnen Annahmen.

Für alle Szenarien wird ein Voranschreiten bei der Digitalisierung, Automatisierung und sinnvollen Vernetzung von Stromverbrauchern und -erzeugern unterstellt. Dennoch ergeben sich Unterschiede im Detail. Für GreenEe1, GreenEe2, GreenMe sowie GreenLate wird unterstellt, dass Effizienzgewinne nicht ausreichen um den Mehrbedarf zu kompensieren. Dementsprechend wird von einem Anstieg in diesem Bereich, sowohl bei den privaten Haushalten als auch im Dienstleistungssektor und produzierenden Gewerbe, ausgegangen. In GreenLife und GreenSupreme wird zumindest im privaten Bereich davon ausgegangen, dass die Verbraucher elektronische Geräte länger nutzen und ihre Kaufentscheidung bewusst hinsichtlich Einsatzzweck, Reparierbarkeit und Erweiterbarkeit treffen.

Durch stetige Anpassungen der Ökodesign-Anforderungen wird eine stetige Reduktion im Bereich Beleuchtung erreicht, wobei hier in allen Szenarien bis auf GreenLate ein identisches Ambitionsniveau unterstellt wird. GreenLate erreicht erst 2040 die Standards, die in den

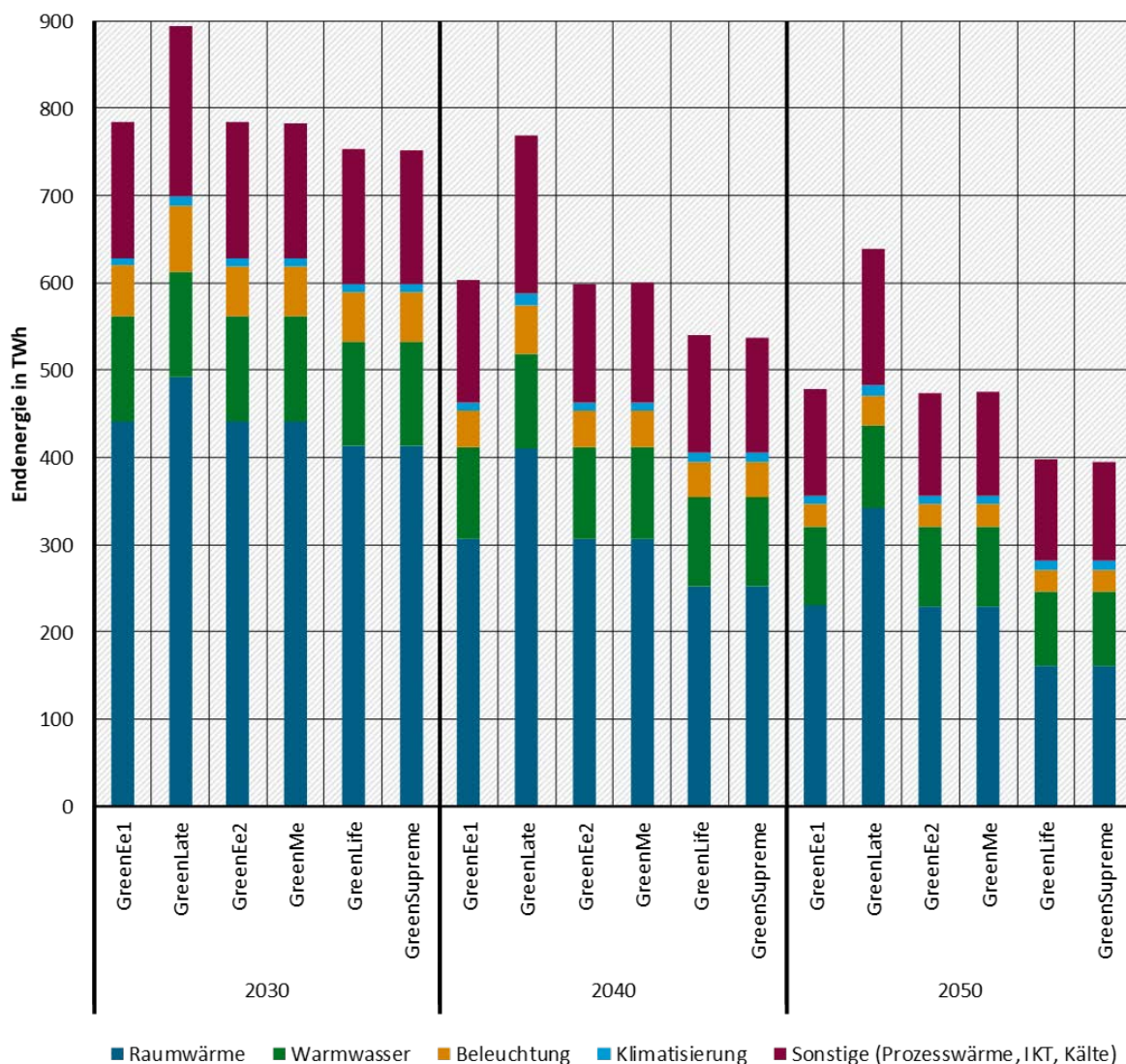
<sup>60</sup> Es wird in allen Green-Szenarien eine mittlere Innentemperatur (mittlere Temperatur über die beheizten und unbeheizten Räume innerhalb des beheizten Gebäudevolumens in Wohngebäuden gemäß der DIN V 4108-6) von weiterhin 19°C in Wohngebäuden angenommen. Die Innentemperaturen von Nichtwohngebäuden ändern sich ebenfalls bis zum Jahr 2050 nicht.

anderen Szenarien bereits 2030 wirken. Bis 2050 kann dieser Rückstand um etwa fünf Jahre nachgeholt werden.

Durch den Einsatz energieeffizienter Geräte, Vermeidung von Standby-Betrieb elektrischer Geräte sowie effektiver Bauweise und Modernisierung von Gebäuden werden die internen Heizlasten reduziert, so dass sich mittels effektiver Lüftungs- und natürlicher Kühlungssysteme auch in den Sommermonaten ein angenehmes Wohnklima erreichen lässt. In Wohngebäuden wird daher in allen Green-Szenarien auf natürliche Kühlung gesetzt. In Nicht-Wohngebäuden sind Klimaanlage bereits heute weitaus häufiger installiert. Es wird in allen Green-Szenarien davon ausgegangen, dass Effizienzgewinne, sowohl bei Verbrauchs- als auch bei Klimatisierungstechniken, und der Anstieg interner Lasten sich die Waage halten, so dass der benötigte Endenergiebedarf zur Klimatisierung auf dem heutigen Niveau verbleibt.

Die resultierende Summe für den benötigten Endenergiebedarf in Gebäuden ist Abbildung 5-41 dargestellt.

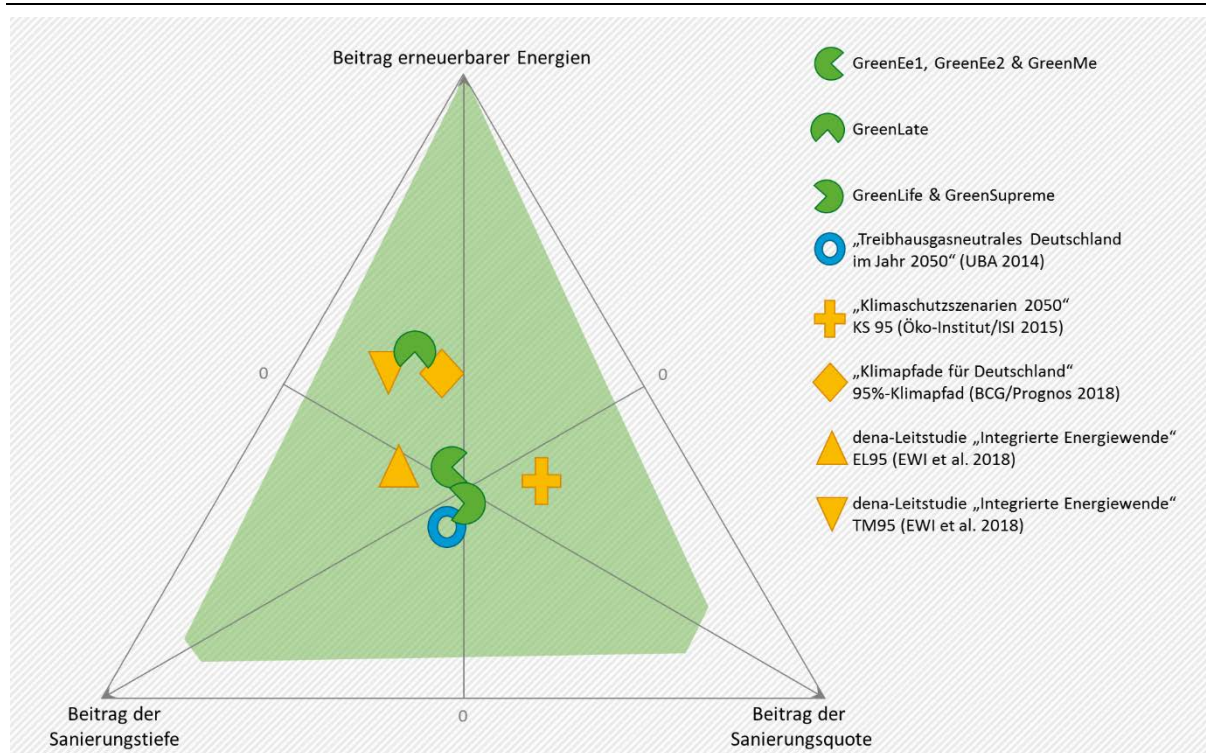
**Abbildung 5-41: Entwicklung des Endenergiebedarfes (inkl. Umgebungswärme) in Gebäuden für die Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die Green-Szenarien spannen mit ihren unterschiedlichen Charakteristiken so einen breiten Lösungsraum bezüglich der Maßnahmen zur Reduktion des Endenergiebedarfes für einen Beitrag zum treibhausgasneutralen Gebäudebestand auf. Diese Maßnahmen haben direkte Auswirkung auf die verbleibenden Mengen an erneuerbaren Energien, welche im Jahr 2050 noch für die Versorgung des Gebäudebestands bereitgestellt werden müssen. Die optimale Kombination hängt von der Entwicklung der Gestehungskosten erneuerbarer Energien ab, sowohl im Stromsektor (z. B. dem technischen Fortschritt bei Wind- und Solarenergie) als auch bei erneuerbaren bzw. alternativen Wärmequellen<sup>61</sup>, aber auch von den Kosten für Effizienzmaßnahmen an der Gebäudetechnik und -hülle. Vor dem Hintergrund der langen Wirkzeiträume in diesem Bereich wird, entsprechend Abbildung 5-38 in allen Green-Szenarien ein frühzeitiges Handeln, wenn gleich ein unterschiedlich ambitioniertes Handeln, unterstellt. Damit erreichen die Green-Szenarien unterschiedliche Varianten eines klimaneutralen Gebäudebestands, welche in Abbildung 5-42 vergleichend zu weiteren Szenarien aus der Literatur dargestellt sind. Gut zu erkennen, beruht der Transformationspfad von GreenEe1, GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme auf sehr großen Erfolgen bei der Bedarfsminderung, welche sowohl bei der Sanierungstiefe, wie auch der Sanierungsrate ausgewogen ambitioniert sind. Bei GreenLife und GreenSupreme wirkt ergänzend die Reduktion der beheizten Fläche. Im Zielbild von GreenLate hingegen wird 2050 noch deutlich mehr erneuerbare Endenergie benötigt. Die Sanierungsrate ist nicht nur in den ersten Dekaden geringer als in den anderen Szenarien, sie steigt auch später kaum an, so dass ihr Anteil an der Dekarbonisierung des Gebäudebestands relativ gering bleibt.

**Abbildung 5-42: Ziele der Szenarien für den Gebäudebestand des Jahres 2050**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (BDI, 2018; dena, 2018; UBA, 2014c)

Nicht nur der Bedarf, sondern auch welche Techniken eine erneuerbare Wärmeversorgung in den Green-Szenarien gewährleisten, wird durch die einzelnen Szenariencharakteristiken bestimmt. Eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung schließt fossile Heiztechniken von

<sup>61</sup> Wie beispielsweise Abwärmequellen.

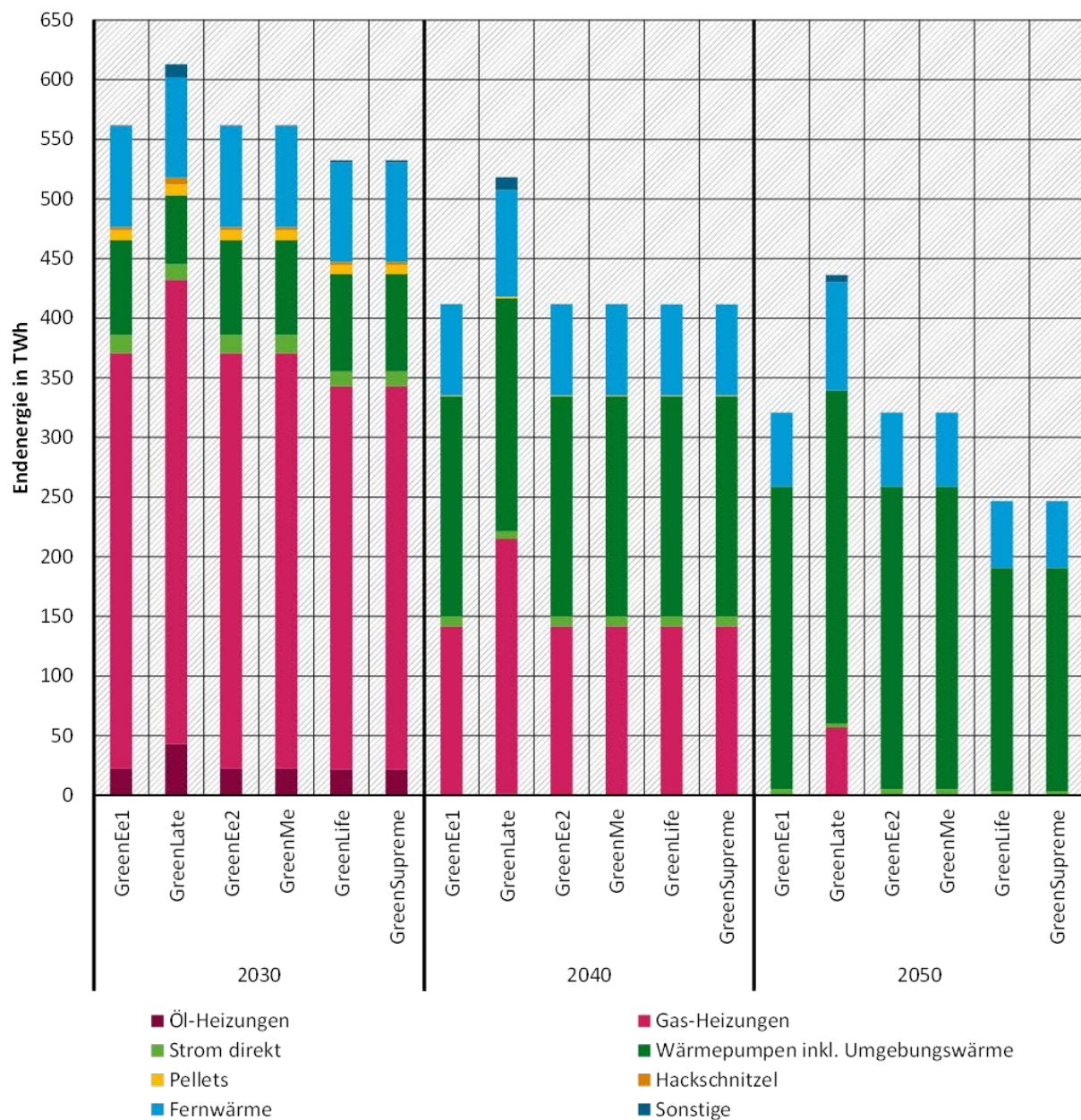
vornherein für alle Green-Szenarien aus. Ambitioniertes Vorgehen bei der Bedarfsreduktion und konsequente Energieeinsparungen erleichtern die Transformation der Wärmeversorgung. Unter Berücksichtigung einer effizienten Nutzung der Ressourcen, auch der erneuerbaren Energien, schließen sich in den meisten Green-Szenarien ein Großteil der konventionellen Heiztechniken gleichfalls aus. Hier wird eine Kombination aus Wärmepumpen und Wärmenetzen auf Basis erneuerbaren Energien zur Wärmeversorgung der Gebäude präferiert. Ein Brennwertkessel beispielsweise bedarf für die Bereitstellung der Nutzenergie deutlich mehr erneuerbare Energien, siehe Kapitel 5.2.1.1.1. In GreenLate kommen vor dem Hintergrund verzögerter Entwicklungen und Investitionsbereitschaft auch im Jahr 2050 noch gasbasierte Techniken zum Einsatz. Damit einhergehend müssen im Vergleich zur Erschließung von Effizienzmaßnahmen und effizienten Sektorkopplungstechniken höhere Systemkosten von der Gesellschaft geleistet werden (ifeu et al., 2018).

In allen Green-Szenarien wird vor dem Hintergrund des Umwelt- und Naturschutzes, der Biodiversität und der Erhaltung natürlicher Kohlenstoffspeicher die energetische Nutzung biogener Materialien, wie Pellets, Waldrestholz oder Hackschnitzeln, in dezentralen Heiztechniken sukzessiv reduziert. Es wird unterstellt, dass vor 2030 keine dezentralen Heizungen mit biogenen Brennstoffen mehr errichtet werden. Entsprechend der Szenarieneigenschaft erfolgt ausschließlich im Szenario GreenLate in der Dekade nach 2040 noch zu geringen Anteilen die energetische Nutzung. In allen anderen Szenarien sind Biomasseheiztechniken bereits nach 2030 ersetzt.

Weiterhin wird in allen Green-Szenarien unterstellt, dass ab 2020 keine Ölheizungen neu installiert werden. Auch die Installation von Gasheizungen inkl. Brennwertkessel erfolgt in der Dekade nach 2030 nicht mehr. Ausschließlich in GreenLate sind 2050 noch solche Techniken in Betrieb und decken dann auf Basis von erneuerbaren PtG noch 13 % des Raum- und Warmwasserbedarfs. Ausschließlich in GreenLate erfolgt weiterhin etwa in Höhe des heutigen Umfangs eine solarthermische Nutzung auf den Dachflächen. Für alle Szenarien gilt: Sowohl in der leitungsgebundenen als auch in der dezentralen Wärmeversorgung ist die flexible Integration in die Stromversorgung selbstverständlich. Dies bedeutet, dass durch Wärmespeicher und PtH („Heizstab“) und flexiblen Bezug von Strom ein wichtiger Beitrag zur systemischen Effizienz geleistet wird.

Die sich in Verbindung mit den Annahmen zur Minderung des Energiebedarfes ergebenden Endenergien und deren Bereitstellung sind in Abbildung 5-43 dargestellt.



**Abbildung 5-43: Entwicklung der Endenergie nach Heiztechniken in den verschiedenen Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Angesichts der Sanierungen und Modernisierungen der Gebäude verdrängen insbesondere Wärmepumpen die konventionellen Techniken. In den beiden GreenEe-Szenarien basieren 2050 79 % der Raum- und Warmwasserversorgung auf Wärmepumpen. Dominierend sind dabei insbesondere Erdwärmesonden<sup>62</sup>, auf denen knapp 50 % der Raumwärmeversorgung in 2050 basiert. Auch in GreenLate dominiert diese Technik leistet jedoch nur rund 37 %, siehe Tabelle 5-19. Das theoretische technische Potenzial für alle erdgekoppelte Wärmepumpensysteme beträgt im Wohngebäudebereich im Jahr 2050 im Mittel über alle Gebäudetypen ca. 70 %, siehe dazu (Beuth Hochschule für Technik & ifeu-Institut, 2017; Dittrich et al., 2020a). Die Green-

<sup>62</sup> Im Mittel erreichen diese eine Jahresarbeitszahl von 4,5. Luft-Wärmepumpen liegen 2050 im Mittel bei JAZ von 4.

Szenarien liegen damit zwar in einem ambitionierten Bereich, aber dennoch mittleren Bereich des technischen Potentials.

**Tabelle 5-19: Rolle von Wärmepumpen in der Gebäudeversorgung in den Green-Szenarien**

		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Anteil an der Raum- und Warmwasserversorgung							
Erdwärmesonden-WP	2030	10,0 %	3,6 %	8,4 %	7,7 %	1,2 %	7,9 %
	2040	29,9 %	14,3 %	29,8 %	29,7 %	22 %	28,6 %
	2050	48,8 %	36,4 %	48,8 %	48,7 %	47,9 %	46,3 %
Luft-WP	2030	5,8 %	5,6 %	5,8 %	6,3 %	2,8 %	10 %
	2040	11,9 %	23,2 %	11,9 %	13 %	9,7 %	18,4 %
	2050	30,1 %	28,6 %	30,1 %	30 %	26,7 %	28,3 %
Bereitgestellte Endenergie in TWh <sup>63</sup>							
Erdwärmesonden-WP	2030	56	22	47	43	6	42
	2040	118	74	119	119	78	101
	2050	140	159	140	142	118	114
Luft-WP	2030	32	35	32	36	15	53
	2040	47	121	48	52	34	65
	2050	86	125	86	87	66	70

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

In urbanen Räumen ist geothermische Umgebungswärme<sup>64</sup> jedoch schwer zugänglich. In den Green-Szenarien wird unterstellt, dass die heutigen Maßnahmen und Förderprogramme, wie MAP, KWKG und Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0, ausgeweitet werden, so dass leitungsgebundene Wärmeversorgung insbesondere in Ballungsgebieten eine tragende Säule der Wärmeversorgung wird. Die netzgebundene Versorgung leisten innovative und moderne Kraft-Wärme-Kopplungssysteme basierend auf Großwärmepumpen<sup>65</sup>, Abwasser-Großwärmepumpen, Solarthermie, und Müllheizkraftwerke.

Es wird unterstellt, dass der Anschlussgrad sich deutlich erhöht und mindestens 20 % der Gebäudewärmeversorgung über Wärmenetze erfolgt. In GreenLife und GreenSupreme basieren rund 24 % der Wärmeversorgung auf Wärmenetzen. Eine aktuelle Studie des Fraunhofer IEE zeigt die Möglichkeit einer Versorgung von 35 bis 37 % mittels Wärmenetzen auf – mit Anteilen

<sup>63</sup> Gerundete Werte.

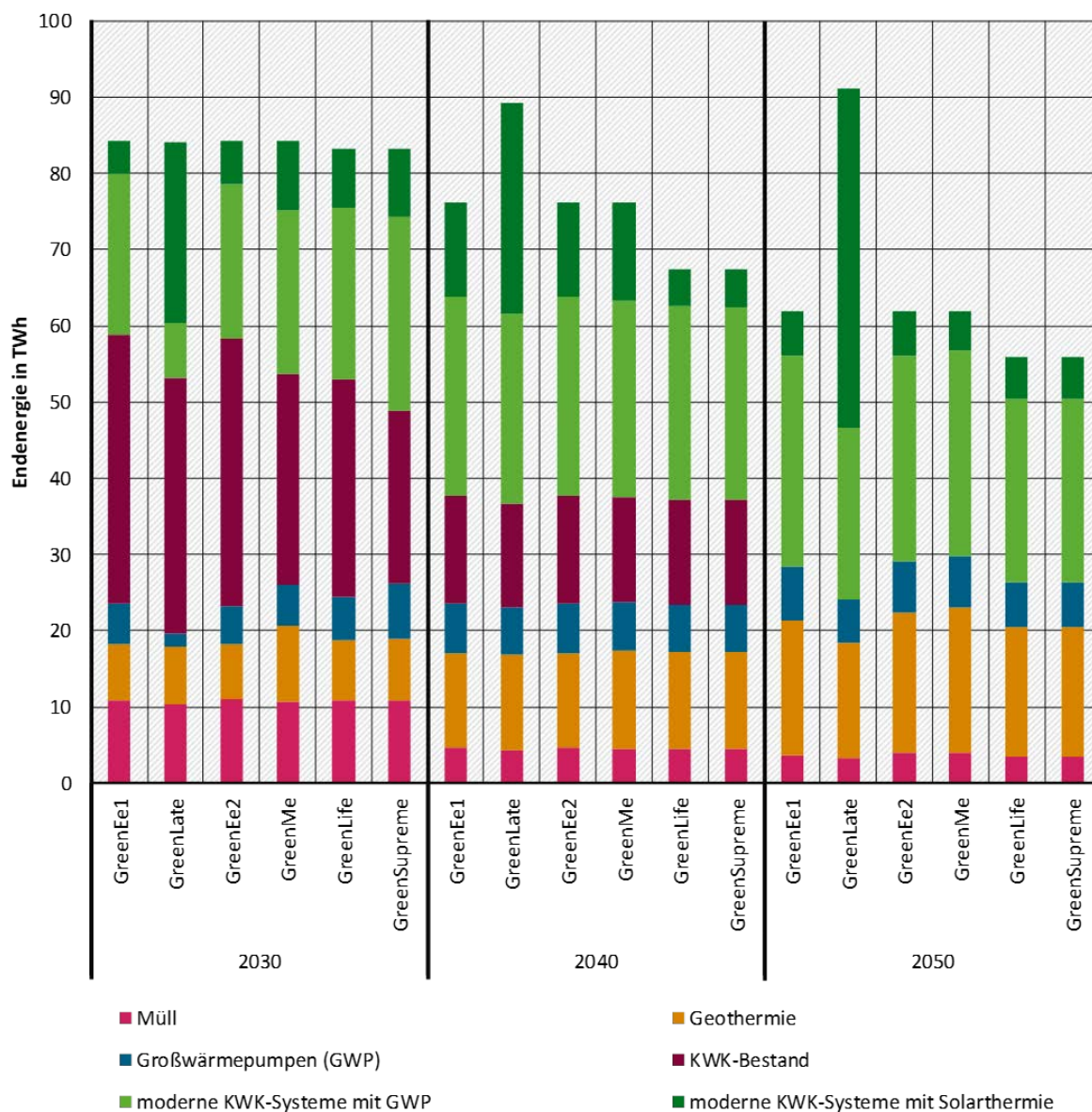
<sup>64</sup> Energie aus Boden, Grundwasser, Gewässern oder Luft.

<sup>65</sup> Großwärmepumpen weisen eine Heizleistung mit mehr als 100 kW auf. Im Vergleich zu dezentralen Anlagen sind dies keine Serienprodukte sondern sind in der Regel Objektbezogen konzipiert.

von bis zu 60 % in Großstädten (Fraunhofer IEE, 2019). Damit liegen die Annahmen der Green-Szenarien, trotz einer Verdopplung des Anteils bis 2050 gegenüber heute, noch nicht im oberen Bereich des Potentials. Dadurch verbleiben im Transformationspfad mehr Handlungsspielräume, was ein erfolgreiches Gelingen einer vollständigen erneuerbaren Energieversorgung wahrscheinlicher macht. Trotz der prozentualen Steigerung reduziert sich der absolute Wert vor dem Hintergrund der Bedarfsreduktion durch Modernisierung und Sanierung auf 91 TWh in GreenLate, 62 TWh in GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe und rund 56 TWh in GreenLife und GreenSupreme.

Die Kraft-Wärme-Kopplungssysteme der leitungsgebundenen Wärmeversorgung vollziehen in allen Green-Szenarien einen Wandel. In 2030 sind die KWK-Systeme in allen Szenarien noch durch den Fortbestand heutiger KWK-Anlagen geprägt und tragen mit knapp 35 TWh zu rund 40 % zur leitungsgebundenen Wärmeversorgung bei. In den Folgejahren werden zunehmend innovative und moderne Kraft-Wärme-Kopplungssysteme integriert. Diese modernen Kraft-Wärme-Kopplungssysteme sind durch einen hohen Anteil erneuerbarer Energie (Großwärmepumpen oder Solarthermie), flexibler gasbasierten KWK-Erzeugung sowie flexiblen Einsatz von Speichern und PtH geprägt. Insbesondere in GreenSupreme erfolgt dieser Wandel schneller, so tragen der KWK-Bestand und klassische KWK-Anlagen in 2030 nur noch knapp 23 TWh oder rund 27 % zur Fernwärmeversorgung bei. Im Jahr 2050 haben diese innovativen und modernen KWK-Systeme die klassischen KWK-Systeme vollständig verdrängt, wie in Abbildung 5-44 erkenntlich. Darüber hinaus kommen bereits vor 2030 Großwärmepumpen in kleineren Nahwärmenetzen zum Einsatz, welche in allen Szenarien fester Bestandteil der Wärmeversorgung werden und 2050 rund 10 % zur leitungsgebundenen Wärmeversorgung leisten. Die tiefe Geothermie wird stetig ausgebaut, so dass diese 2050 in den Green-Szenarien 15 bis 19 TWh beiträgt. Damit basieren zwischen 26 % und 31 % der leitungsgebundenen Wärmeversorgung auf dieser erneuerbaren Energiequelle. In GreenLate ist der Anteil aufgrund des höheren Bedarfes geringer und beträgt knapp 17 %. Vor dem Hintergrund der veränderten Lebensweise, stärkerer Abfallvermeidung und mit der Bevölkerungsentwicklung einhergehendes rückläufiges Abfallaufkommen sinkt der Energiebeitrag des Mülls in allen Szenarien bis 2050 auf rund 6 % und in GreenLate auf nur knappe 4 %.



**Abbildung 5-44: Entwicklung der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### TextBox 5-4: Umweltverträglichkeit von Wärmepumpensystemen

Wärmepumpensysteme spielen in den Green-Szenarien sowohl in der dezentralen Wärmeversorgung (Luft-Wärmepumpen und erdgekoppelte Systeme) als auch in kleineren Nahwärmenetzen der Quartiere (Großwärmepumpen) eine große Rolle.

Die Nachhaltigkeit von Wärmepumpensystemen ist wesentlich durch ihre Energieeffizienz bestimmt. Einerseits bestimmt das technische Anlagendesign die Jahresarbeitszahl, andererseits ist die Effizienz auch abhängig von der Heizlast der Gebäude. Die Effizienz erdgekoppelter Systeme ist neben der Ergiebigkeit der Ressource (d. h. ihrer gewinnbaren Wärme- bzw. Kältemenge) auch durch ein nachhaltiges Ressourcenmanagement<sup>66</sup> bedingt. Hybride Systeme, die mehrere

<sup>66</sup> Darunter wird eine auf das Jahr ausgeglichene Energiebilanz im Untergrund, d. h. der Energiezufluss ist gleich der Energieentnahme im Nutzungsraum, verstanden.



Niedertemperaturquellen nutzen, können den Bedarf an Antriebsenergie von Wärmepumpen weiter senken.

Zum effizienten Anlagendesign trägt auch die Wahl des Kältemittels bei. Immer noch sind Fluorkohlenwasserstoffe und Mischungen von HFKW als Wärmepumpenfluide im Einsatz, deren Treibhausgaspotenzial das von CO<sub>2</sub> um das bis zu 3.000-fache übersteigt. Eine Freisetzung dieser Gase in die Atmosphäre gilt es zu verhindern. Die Substitution dieser Fluide durch natürliche Kältemittel, wie Propan und CO<sub>2</sub>, oder andere klimafreundliche Alternativen ist erforderlich. Hersteller passen das Design von Wärmepumpen an alternative Kältemittel an, denn die F-Gas-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014) (UBA, 2016h) steuert die schrittweise Reduzierung der Verwendung fluorierter Treibhausgase um insgesamt 79 % bis zum Jahr 2030.

Mit dem Zubau von Luftwärmepumpen entsteht eine neuartige Lärmbelästigung in Wohngebieten. Der Lärmpegel von Luftwärmepumpen liegt unter den gesetzlichen Grenzwerten, hat jedoch Lärmspitzen in den tiefen Frequenzbändern. Diese Geräuschemission können mit einfachen technischen Maßnahmen gesenkt werden. Hersteller bieten Lösungen an und Richtlinien für die Installation sowie der UBA-Leitfaden „Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld“ (UBA, 2017c) helfen Störungen zu vermeiden.

Beim Ausbau von Wärmepumpensystemen ist die Flächenneuanspruchnahme vernachlässigbar. Werden ober- und unterirdische Leitungen im Außenbereich verlegt, können naturschutz- und landschaftsrechtliche Belange betroffen sein, und eine entsprechende behördliche Genehmigung ist nach den Regelungen des Naturschutz- und Landschaftsrechts einzuholen.

Das Gewinnen von Erdwärme mittels Erdwärmesonden erfolgt über Erschließungsbohrungen. Dabei gelten ökologisch sensible Bereiche als Restriktionszonen und sind von der Nutzung ausgeschlossen.<sup>67</sup> Besonders in Regionen hoher Bebauungsdichte sollte i.d.R. auf Infrastruktur- und Siedlungsflächen ebenso nicht gebohrt werden. Bodennutzungsbeschränkungen, geophysikalische oder technische Einschränkungen wie Wärmeübertragung und Sondendichte etc. sind beim Ausbau zu berücksichtigen. Sämtliche Geothermiebohrungen, die „mehr als hundert Meter in den Boden eindringen sollen“ (§ 127 BbergG), sind der zuständigen Bergbehörde anzuzeigen. Dezentrale Erdwärmesonden, deren Endtiefe geringer als 100 m ist und deren Erdwärmennutzung auf einem Grundstück ohne Beeinflussung eines Nachbargrundstücks erfolgt oder wenn Erdwärme bis zu einer Heizleistung von 30 kW gewonnen wird, sind bergrechtlich nicht relevant. Jedoch besteht Anzeigepflicht nach dem Lagerstättenrecht (i.d.R. bei den Staatlichen Geologischen Diensten der Länder).

Bei groß dimensionierten Grundwasserabsenkungen, im Rahmen des Betriebs von Brunnenanlagen, kann u.U. die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung nach UVPG erforderlich werden. Die Erkundung der geothermischen Ressource und die Errichtung geothermischer Wärmepumpenanlagen sind weiterhin bau-, bodenschutz- und immissionsschutzrechtlichen Vorschriften, die dem Grundsatz des vorsorgenden Umweltschutzes folgen, unterworfen. Für die Planung, Genehmigung, Ausführungen, den Ausbau von Bohrungen und den Bau der Wärmepumpenanlage gelten detaillierte technische Vorschriften und vielfältige Schutzvorkehrungen und -vorschriften, welche auf die Minimierung von Umweltbelastungen ausgerichtet sind.

Von besonderem Interesse sind die anthropogene thermische Beeinflussung des Untergrunds und die Wechselwirkung zu der thermischen Beeinflussung durch den Betrieb einer geothermischen

<sup>67</sup> Geregelt nach Wasserrecht: EU-Regelungen, deutsches Wasserhaushaltsgesetz (WHG), entsprechende Ländergesetze.

Anlage. In städtischen Gebieten liegen die Grundwassertemperaturen oft deutlich über dem natürlichen Hintergrund. Eine Abkühlung in Richtung natürlicher Hintergrundtemperaturen durch Wärmeauskopplung zum Beheizen von Gebäuden kann aus ökologischer Sicht durchaus vorteilhaft sein. Für den Fall der Kühlung mit geothermischen Wärmepumpen bestehen nach Ansicht des UBA noch unzureichende gesetzliche Regelungen zur Wirkung induzierter Temperaturänderungen auf die physikalisch-chemische Beschaffenheit und das Ökosystem des Grundwassers.

### 5.3.5 Tiefbau

Neben dem Hochbau, welcher in den Green-Szenarien im Wesentlichen durch die Entwicklungen des Wohngebäudebestandes geprägt ist, ist auch der Tiefbau von hoher Relevanz für den Ressourcen- und Klimaschutz. Zum Tiefbau werden vor allem die unterschiedlichen Infrastrukturen wie Verkehrsinfrastruktur (Straßen, Gleise) inklusive der entsprechenden Ingenieurbauwerke (Brücken, Tunnel) und die Ver- und Entsorgungsnetze gezählt<sup>68</sup>.

Die zukünftige Entwicklung der Infrastrukturen ist zu einem hohen Anteil von Art und Umfang zukünftiger Bauaktivitäten im Hochbau abhängig und beeinflusst die Flächenneuanspruchnahme. Gleichzeitig können aber entsprechende Maßnahmen für ein flächensparendes Bauen relevanten Einfluss auf den zukünftigen Umfang neuer Infrastrukturen haben. Dabei ist zu beachten, dass ökologische, soziale, technische und ökonomische Wandelprozesse die Anforderungen an vorhandene Infrastrukturen verändern. Insbesondere der Klimawandel und die damit einhergehende Zunahme von Extremwetterereignissen, wie Starkregen, sowie der demographische Wandel müssen bei der Planung neuer und Umgestaltung bestehender Infrastruktursysteme zusätzlich berücksichtigt werden. Gleichzeitig sind Infrastrukturen zumeist auf Langlebigkeit ausgelegt, woraus sich nur mittelfristig steuerbare Pfadabhängigkeiten ergeben. Daher gilt es bestehende und zukünftige Infrastrukturen resilient gegenüber ökologischen, ökonomischen und sozialen Effekten zu gestalten (vgl. (Trapp et al., 2018), siehe Textbox 5-5).

#### 5.3.5.1 Verkehrsinfrastruktur

Verkehrsinfrastruktur weisen vielfältige ökologische Wirkungen auf. So ist ein Großteil der Verkehrsinfrastruktur, vor allem die Straßeninfrastruktur, versiegelt, d. h. asphaltiert, betonierte, gepflastert, verdichtet oder anderweitig befestigt. Dadurch verlieren die Böden wesentliche Funktionen, wie die Fähigkeit zur Wasseraufnahme oder die Regulierung des Kleinklimas. Häufig führt der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur zum Verlust land- und forstwirtschaftlicher Fläche und somit auch zum Verlust fruchtbarer Böden. Mit dem zunehmenden Ausbau bzw. der zunehmenden Verdichtung der Verkehrsinfrastruktur entstehen auch neue Belastungsquellen für Lärm und Abgase mit entsprechenden Gesundheitswirkungen.

Daneben sind Verkehrsinfrastrukturen aber auch materialintensiv, sowohl im Bau und häufig auch in der Unterhaltung. So geben (Knappe et al., 2015) ein Materiallager von rund 4,2 Mrd. t für den aktuellen Straßenkörper inklusive Wirtschaftswege in Deutschland an. Zusätzlich zeigen Abschätzungen zum Neubau von Straßen (Steger et al., 2011) einen jährlichen Materialbedarf von rund 21 Mio. t und für die jährlichen Unterhaltungsaufwendungen von rund 69 Mio. t (Bergmann et al., 2015). Zusätzlich binden straßenbegleitende Ingenieurbauwerke wie Brücken und Tunnel rund 107,1 Mio. t Beton und 24,7 Mio. t Stahl (Knappe et al., 2015). Die Schieneninfrastruktur inklusive Tunnel, Brücken und Leitungen zur Energieversorgung weist

<sup>68</sup> In der vorliegenden Studie werden in den Rohstoffbetrachtungen auch die Energieerzeugungsanlagen modelltechnisch dem Tiefbau zugeordnet. Art und Umfang sowie die jeweiligen szenariospezifischen Spezifikationen werden in Kapitel 5.2 ausführlich dargestellt.

nach (Bergmann et al., 2015) insgesamt ein Materiallager von rund 512 Mio. t auf, der jährliche Erneuerungsaufwand wird auf rund 14 Mio. t geschätzt.

#### **Textbox 5-5: Resiliente Infrastrukturen**

Insbesondere weil Infrastrukturen relevante Ressourcen-, Material- und Energieströme bedingen diese aber zugleich auch grundlegend strukturieren, sind sie relevant für die Umweltpolitik. Dabei sind Infrastrukturen und deren Entwicklung nicht allein eine technische Angelegenheit, sondern sie sind eng verwoben einerseits mit den Zukunftsvorstellungen von Gesellschaften und andererseits mit den alltäglichen Handlungen der Individuen. Insofern werden Infrastruktursysteme als komplexe sozio-ökonomische und sozio-technische Systeme mit schwer voneinander abgrenzbaren technischen, wirtschaftlichen und institutionellen Subsystemen verstanden. Auch deswegen sollten die ökologischen, ökonomischen und sozialen Auswirkungen wie Klimawandel, demographischer Wandel, Digitalisierung, Privatisierung und Rekommunalisierung beim Bau neuer Infrastrukturen, der Instandsetzung und Umwandlung bestehender Infrastrukturen sowie beim Betrieb und Rückbau von Infrastrukturen beachtet werden. Neue Infrastrukturen sollten insbesondere so gestaltet werden, dass sie auch unter derzeit nur vage abschätzbaren Bedingungen und zunehmenden Störungen (Extremwetterereignisse) leistungsfähig, sozial und ökonomisch verträglich, ressourcenschonend und -effizient, finanziell tragfähig, also resilient sind (Trapp et al., 2018).

Resilienz ist ein ursprünglich technischer Begriff, der daher anscheinend einfach auf technische Systeme, wie Infrastrukturen, angewendet werden kann. Er ist eng verbunden mit einem Risikomanagement, das für Unternehmen und Infrastrukturbetreiber vertraut sein sollte. Da Infrastrukturen primär der Sicherung der Daseinsvorsorge dienen, sind resiliente Infrastruktursysteme eine wichtige Grundlage für eine sichere Versorgung der Bevölkerung. Resiliente Infrastruktursysteme meinen zunächst „robuste“ Systeme, die eine hohe Widerstands- und Bewältigungsfähigkeit besitzen und je nach Stärke der Störung flexibel reagieren: bei geringer Störung können sie leicht wieder in den Status Quo zurückkehren und bei starker Störung oder sich schrittweise ändernden Rahmenbedingungen entsprechenden Anpassungen vollziehen.

Wenn man Resilienz über diese technische Sichtweise hinaus auch als Fähigkeit zur Anpassung begreift und damit die Lernfähigkeit der Systeme betont, stellt sich die Frage, wer oder was lernen bzw. erinnern soll. Lernen führt bei technischen Systemen – z. B. bei neuronalen Netzen – häufig zu einer Überschreibung und damit dem Vergessen eines alten Zustands. Lernen in sozialen Systemen umfasst auch ein Abwägen von unterschiedlichen Erfahrungen mit ähnlichen Problemen, um neue Lösung zu generieren. Daher wird auch hier deutlich, dass Infrastrukturen als sozio-technische und sozio-ökonomische Systeme verstanden werden müssen, die sich weiterentwickeln, wobei nicht deren technischer Zustand, sondern deren Dienstleistungen im Verhältnis zu den Bedürfnissen der Menschen im Vordergrund stehen sollten. Bedürfnisse unterscheiden sich örtlich und wandeln sich zeitlich. Daher zwingt die systemische Perspektive auch hier dazu, dass Infrastrukturgestaltung auf den Bedürfnissen der Nutzer aufbauen sollte. Aufgrund der zunehmend stärkeren Vernetzung der Systeme, insbesondere durch die Digitalisierung, wird es immer wichtiger, sektorübergreifende Planungs- und Managementprozesse zu gestalten. Die treibhausgasneutrale, ressourceneffiziente, sozial gerechte und finanziell tragfähige Anpassung von Infrastrukturen an starke Klimaänderungen steht als Beispiel für die Gestaltung resilienter Infrastrukturen.

Die beschriebenen ökologischen Wirkungen die mit der Neuinanspruchnahme von Verkehrsflächen, insbesondere der Versiegelung, einhergehen, werden in den Green-Szenarien mit dem Aspekt der Flächenneuinanspruchnahme adressiert (vgl. Kapitel 5.3.2). Es gilt aber

auch die Verkehrsinfrastrukturen und ihre Entwicklungen hinsichtlich ihres Materialbedarfes für Neubau und Unterhaltung zu betrachten. Zu ihrer Ableitung kam die in (Dittrich et al., 2018) beschriebene Methodik zur Anwendung. Datengrundlage für die Entwicklung der Straßeninfrastruktur in allen Green-Szenarien außer GreenLate<sup>69</sup> war das Szenario 3 „2050, politische Zielsetzung“ in (Knappe et al., 2015). GreenLate basiert auf dem Referenz-Szenario der gleichen Studie. Abweichend von Knappe et al. erfolgt in allen Szenarien eine Substitution von Bitumen durch Lignin, da Bitumen im Transformationspfad nicht mehr produziert wird. Ergänzt wurden die Annahmen um wesentliche Parameter für den Straßenneubau und die straßenbegleitenden Ingenieurbauten aus (Steger et al., 2011) und für die Unterhaltsleistungen aus (Bergmann et al., 2015). In GreenMe und GreenSupreme wurde zusätzlich bei den Ingenieurbauten eine schrittweise Steigerung des Einsatzes von Textilbetonen unterstellt, so dass bis 2050 20 % des Stahlbeton substituiert werden (vgl. Kapitel 5.3.3.2).

In den Szenarien, in denen die Einführung des Oberleitungs-LKW vorgesehen ist, gilt es auch Annahmen zum Materialbedarf für die Oberleitungen entlang der Straßen zu ermitteln. Aufgrund der noch offenen Technologieentscheidung zur Versorgung des Straßenverkehrs mit Strom (vgl. (Wietschel et al., 2017)) und der somit fehlenden fundierten Daten zu den benötigten Materialien und Materialmengen, wurde vereinfachend die Materialkennzahlen (Neubau, Bestand und Unterhaltungsaufwendungen) der Oberleitungsinfrastruktur von Eisenbahnen aus (Bergmann et al., 2015) zur Abschätzung der Aufwendungen genutzt. Für 2050 wurden entsprechende Unterhaltungsaufwendungen entlang der Lebensdauer für die Bauteile abgeleitet.

In allen Green-Szenarien wird für Rohstoffbetrachtungen der Schieneninfrastruktur auf (Bergmann et al., 2015) Bergmann et al., 2015 zurückgegriffen. Entsprechend der dort beschriebenen Annahmen werden jährlich im Schnitt 125km Gleislänge neu- und ausgebaut. Dies stellt etwa eine Fortschreibung der bis 2019 geplanten Ausbaulängen bis 2050 dar, was konsistent mit dem Anstieg der Verkehrsleistungen der Bahn, insbesondere der Anstiege im Güterverkehr (vgl. Kapitel 5.4.3.2), ist. Zu beachten ist, dass bei Neubau Bahnschwellen aus Beton und Recyclingkunststoff und bei Erneuerung überwiegend aus Recyclingkunststoff zur Anwendung kommen.

Bezüglich der Wasserverkehrsinfrastruktur wird ein kontinuierlicher Zubau bzw. Erweiterung von Häfen, Schifffahrtsstraßen und Schleusen im Inland und an der Küste entsprechend der auf dem Wasserweg zu transportierenden Gütermenge auf dem gegenwärtigen geringen Niveau unterstellt. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und des notwendigen Küsten- und Binnenlandschutzes wird zusätzlich eine Fortschreibung von Deichaufschüttungen und -verstärkungen sowie ein kontinuierlicher Ausbau von Talsperren auf dem aktuellen niedrigen Niveau angenommen unterstellt. Der Materialaufwand für den Neubau basiert auf (Steger et al., 2011). Anhand der durchschnittlichen Lebensdauer werden entsprechend dem Vorgehen und den Annahmen von (Bergmann et al., 2015) die Materialaufwendungen für die Unterhaltungsmaßnahmen ermittelt.

Sonstige Verkehrs Großprojekte wie Flughafenneubauten wurden nicht einbezogen.

#### **5.3.5.2 Versorgungsinfrastruktur**

Während die Entwicklung der Infrastruktur für die Versorgung z. B. mit Wasser und Kommunikationsleistungen und die Entsorgung häufig in Relation zur Flächenneuanspruchnahme, insbesondere der Entwicklung der Siedlungsfläche, steht, ist die Energieversorgungsinfrastruktur eher vom Energiebedarf sowie Art und Ort der

---

<sup>69</sup> Jeweils angepasst an die szenariospezifischen Annahmen zur Flächenneuanspruchnahme und der Verkehrsleistungen.



Energieerzeugung bestimmt. Dies gilt umso mehr in einem auf erneuerbaren Energien basierendem Energiesystem. Daher werden die relevanten Entwicklungen der Infrastruktur zur Energieversorgung in Kapitel 5.2 und zur Wärmeversorgung im Gebäudebereich in Kapitel 5.3.4 ausführlich dargelegt, die Grundlage für die Berechnung der Materialaufwände der Energienetze (Strom, Gas, Wärme) bildet wiederum (Bergmann et al., 2015).

In der Wasserver- und -entsorgung wurde der Neubau linienbezogener Infrastrukturen zur Wasserverteilung und Wasserableitung wie Rohre, Pumpwerke und Schächte entsprechend den szenariospezifischen Annahmen zur Flächenneuanspruchnahme abgeleitet. Der Neubau der Anlagen zur Fassung, Behandlung und Speicherung des Wassers bzw. Abwassers (Brunnen, Wasserwerke, Kläranlagen, Regenwasserauffangbecken und -rückhaltebecken etc.) wurden abhängig von der Bevölkerungsentwicklung ermittelt. Somit ist der Neubau der Wasserver- und -entsorgung rückläufig, in 2050 findet kein Neubau von Wasserver- und -entsorgungsrohren statt. Wesentliche Informationen zu den Materialaufwendungen des Neubaus, der Unterhaltungsaufwände sowie der Lebensdauern wurden aus (Steger et al., 2011) und (Bergmann et al., 2015) entnommen. In GreenMe wird abweichend eine höhere Recyclingquote von 90 % in 2050 bei der Erneuerung von ungebundenen Schichten angenommen. Das heißt, dass bis zu 90 % der bei Erneuerungsarbeiten entnommenen Rohstoffmenge aufbereitet und in ungebundenen Schichten wieder eingesetzt wird. In 2030 beträgt die Quote 75 % und in 2040 80 %. Dies reflektiert eine zunehmende Marktdurchdringung von verbesserten RC-Technologien, ausgelöst durch erhöhte entnommene Rohstoffmengen bei steigenden Erneuerungs- und Unterhaltungsmaßnahmen.

Im Bereich Informations- und Kommunikationsinfrastruktur (IuK) wurde von (Bergmann et al., 2015) der Bestand im Basisjahr übernommen. Der Bestand in 2050 wurde entlang der Siedlungsentwicklung berechnet. Das bedeutet, dass in 2050 kein weiterer Neubau stattfindet. Ein weiterer Ausbau überregionaler IuK-Netze wurde nicht unterstellt. Die Unterhaltungsaufwendungen für den Gesamtbestand in 2050 wurden ausgehend von der in (Bergmann et al., 2015) genannten Lebensdauern ermittelt. Bettungssande wurden hierbei nicht einbezogen, um Dopplungen zu vermeiden. Diese sind bereits bei anderen Linieninfrastrukturen wie der Wasserversorgung, enthalten, da häufig die IuK-Infrastruktur zeitgleich mit bzw. über den Wasserleitungen verlegt wird.

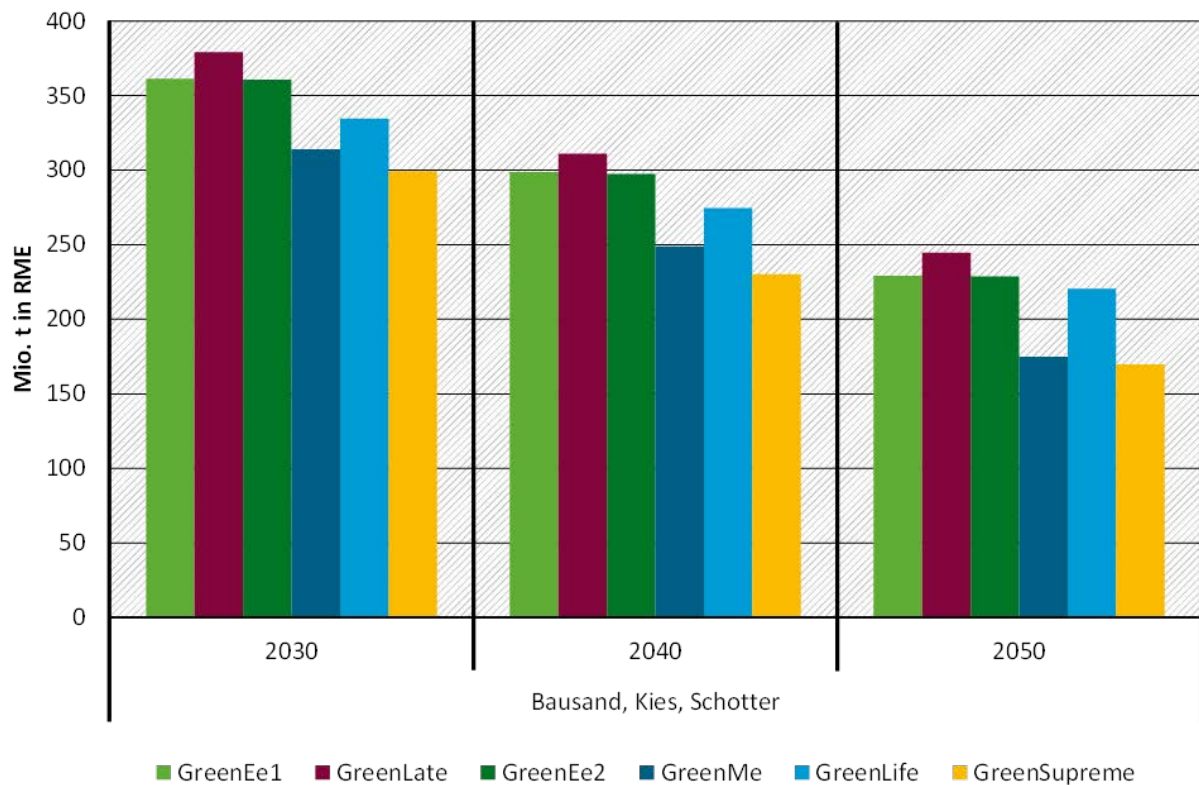
### **5.3.6 Entwicklung ausgewählter Rohstoffbedarfe und Flächenneuanspruchnahme**

Die hauptsächliche Analyse der Rohstoffbedarfe einzelnen Szenarien und die Untersuchung der Auswirkungen der unterstellten Maßnahmenbündel auf die Rohstoffnutzung erfolgt in Kapitel 6.2. Dennoch lassen sich an dieser Stelle einige spezifische Aussagen für den Sektor Bauen und Wohnen beziehungsweise das Bedürfnisfeld Wohnen treffen.

So lassen sich die Effekte der getroffenen Annahmen sowohl zur Entwicklung und Ausgestaltung des Gebäudebestandes wie auch der Infrastrukturen in Verbindung mit der Flächenneuanspruchnahme bereits am Bedarf an Bausand, Kies und Schotter (letzte inländische Verwendung) in den einzelnen Green-Szenarien erkennen (Abbildung 5-45). Der deutlich geringere Bedarf an diesen Baustoffen in GreenMe im Vergleich zu den anderen Szenarien, mit Ausnahme GreenSupreme, lässt sich unter anderem mit dem deutlich erhöhten Anteil von Gebäuden in Holzbauweise erklären, insbesondere in Verbindung mit dem deutlich erhöhten Bedarf an Holz in diesen beiden Szenarien (Abbildung 5-46). Weitere Einflussparameter sind hier die Substitution von Stahlbeton durch Textilbetone sowie die insgesamt höhere Rohstoffeffizienz von 1,2 % pro Jahr in GreenMe. Der geringere Bedarf an Bausand, Kies und Schotter in GreenLife beispielsweise im Vergleich zu GreenEe2 kann zu großen Teilen auf die geringere Wohnfläche und die Annahme zur Flächenneuanspruchnahme

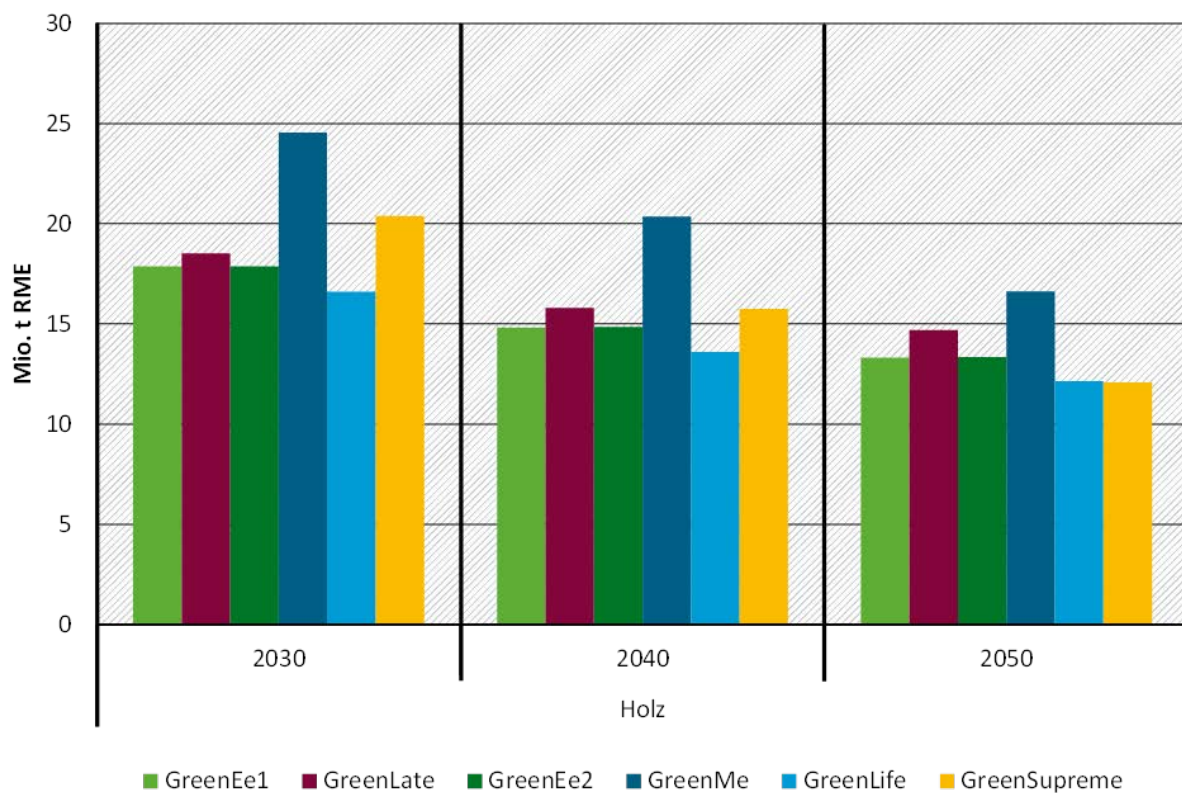
zurückgeführt werden. Green Supreme weist den geringsten Bedarf der genannten Baustoffe auf, da sich hier die Effekte aus GreenMe und GreenLife ergänzen. In den Werten zu GreenLate hingegen sind sehr gut die Effekte der geringeren Rohstoffeffizienz, Recyclingraten in Hoch- und Tiefbau sowie der Wohnflächenentwicklung zu erkennen, ausgedrückt durch den höheren Bedarf.

**Abbildung 5-45: Entwicklung der Bedarfe an Bausand, Kies und Schotter (letzte inländische Verwendung) in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Abbildung 5-46 zeigt den Bedarf bzw. die Inanspruchnahme (letzte inländische Verwendung) von Holz in den einzelnen Green-Szenarien. Wenn gleich diese nicht nur durch die Nachfrage aus dem Bausektor bestimmt wird, sondern beispielsweise auch aus der Möbel- und Verpackungsindustrie, so ist der Bausektor doch ein dominierender Nachfrager. Daher zeigt sich auch im Bedarf an Holz in GreenMe der Effekt des deutlich gesteigerten Wohnungsbaus in Holzbauweise sowie der Substitution abiotischer Rohstoffe durch Holz, wie beispielsweise für die Gebäudedämmung. Auch in GreenSupreme liegt der Holzbedarf in 2030 und 2040 über dem der anderen Szenarien, auch dies begründet durch den verstärkten Holzbau. Der geringere Bedarf gegenüber GreenMe ist im Wesentlichen darin begründet, dass hier das Verhältnis von Ein- und Zweifamilienhäusern zu Mehrfamilienhäusern verändert wurde und prozentual weniger Mehrfamilienhäuser in Holzbauweise errichtet werden (vgl. auch Kapitel 5.3.3.2).

**Abbildung 5-46: Inanspruchnahme von Holz (letzte inländische Verwendung) in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### Rohstoffaspekte der energetischen Sanierung

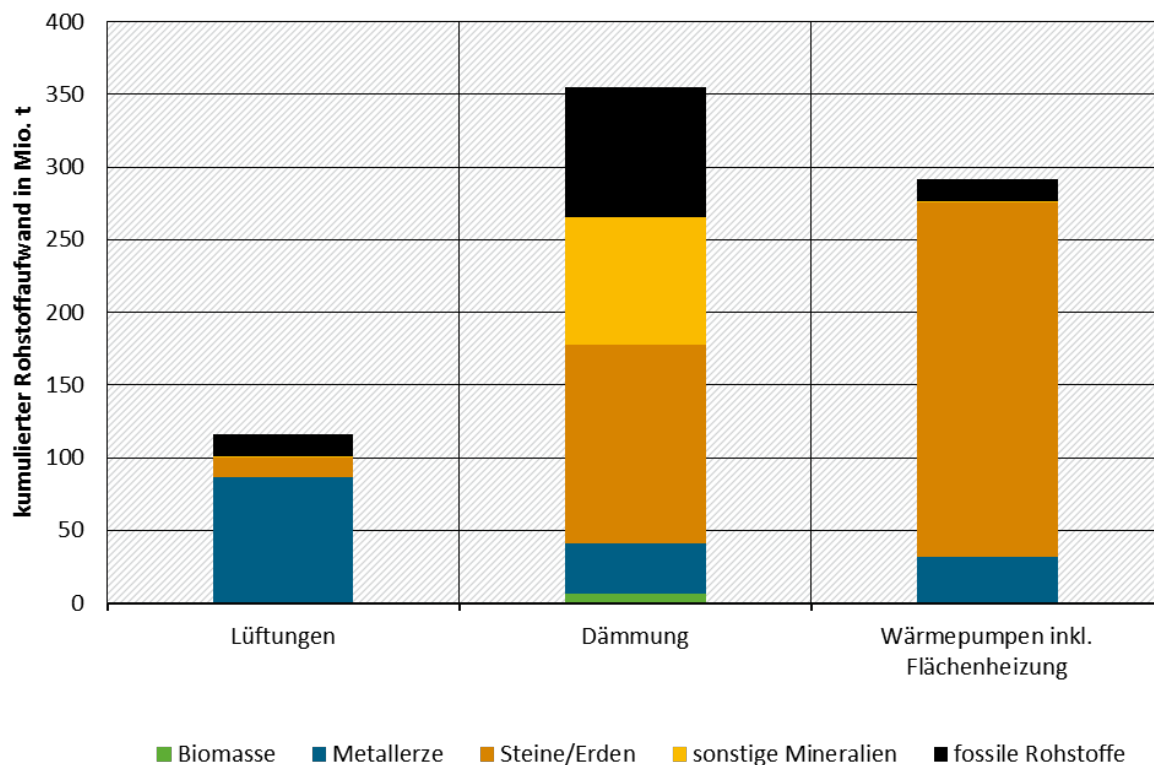
Die Umsetzung der in den Szenarien beschriebenen Sanierungsraten und Sanierungsstandards sowie die Umstellung der Wärmebereitstellung auf erneuerbare Energien erfordert zunächst eine erhöhte Rohstoffinanspruchnahme. Doch wird beispielsweise der Bedarf für Dämmmaterialien recht bald durch Einsparungen von Rohstoffen zur Energieversorgung, zunächst fossiler Energieträger und später dann Rohstoffe zum Aufbau des erneuerbaren Energiesystems, überkompensiert (vgl. auch (Dittrich et al., 2018; Ritthoff et al., 2015)).

Abbildung 5-47 zeigt exemplarisch den kumulierten Rohstoffaufwand von 2010 bis 2050 für die in GreenEe1 umgesetzte Gebäudedämmung (mittlere Säule), sowie die zum Einsatz kommenden Lüftungssysteme (links) und Wärmepumpen inkl. Flächenheizungen (rechts). Dieser beträgt für die drei Komponenten 820 Mio. t, wobei der Rohstoffaufwand für die unterstellte Dämmung mit 354 Mio. t den größten Anteil aufweist. Der jährliche kumulierte Rohstoffaufwand beträgt für alle drei Komponenten zusammen knapp 20,5 Mio. t<sup>70</sup>. Der jährliche kumulierte Rohstoffaufwand für die Wärmeversorgung von Gebäuden betrug im Jahr 2010 nach (Dittrich et al., 2018) in etwa 48,7 Mio. t (Dittrich et al., 2018) ermittelten, dass dieser sich durch eine Umsetzung des „Effizienzhaus 40“-Standards der KfW (KfW, 2018) im Gebäudebestand eine Einsparung um rund 33,6 Mio. t auf 15,1 Mio. t jährlich erzielen lässt. Damit wird deutlich, dass trotz relativ hohen Rohstoffaufwand für die energetische Sanierung des Gebäudebestandes insgesamt im Vergleich zur Trendfortschreibung erhebliche Rohstoffminderungen erfolgen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der jährliche kumulierte Rohstoffaufwand der

<sup>70</sup> Dabei werden vereinfachend die kumulierten Rohstoffaufwände gleichmäßig auf 40 Jahre verteilt.

Wärmeversorgung in den Green-Szenarien aufgrund der teilweise höheren Effizienzen und der Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien in den Green-Szenarien nochmals unter 15,1 Mio. t liegt<sup>71</sup>.

**Abbildung 5-47: Kumulierter Rohstoffaufwand für Lüftungen, Wärmepumpen inkl. Flächenheizungen und Gebäudedämmungen im GreenEe1-Szenario**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### Bedürfnisfeld Wohnen

Neben dem Rohstoffaufwand für Gebäude und Infrastruktur sind auch laufende Rohstoffaufwände für unser Bedürfnis für ein angenehmes Wohnen notwendig. Neben der Wohnungsausstattung sind hier auch die Haushaltsführung sowie gelegentliche Renovierungs- und Verschönerungsarbeiten an den eigenen oder gemieteten vier Wänden berücksichtigt. Abbildung 5-48 zeigt die Rohstoffinanspruchnahme für das Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt in Kilogramm pro Person für das Jahr 2050 in den unterschiedlichen Green-Szenarien.

Erwartungsgemäß zeigt GreenLate die höchste Rohstoffinanspruchnahme, gefolgt von GreenEe1 und GreenEe2. GreenSupreme weist den geringsten Rohstoffkonsum auf. Erkennbar ist auch hier wieder, dass die Annahme zur technologischen Entwicklung außerhalb Europas in GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife zu einem geringen Bedarf an fossilen Rohstoffen (in den importierten Produkten) führt.

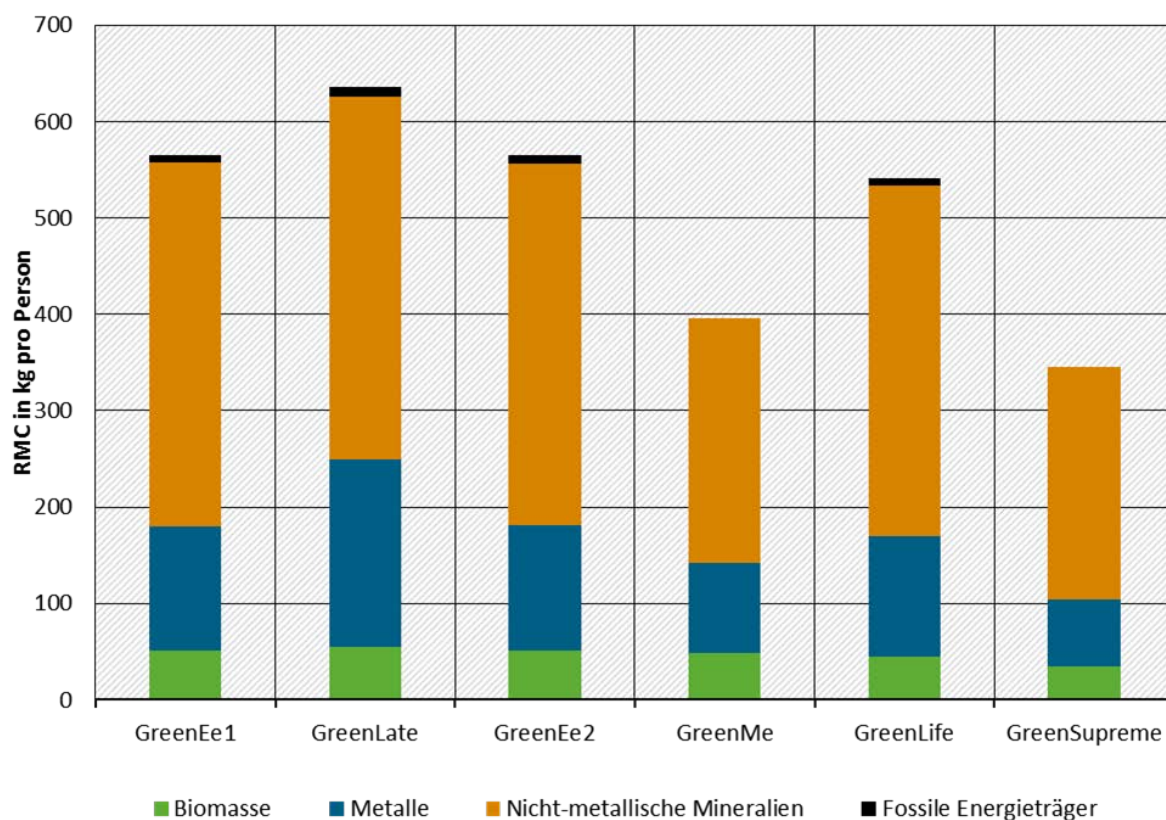
Auffällig und auf den ersten Blick überraschend ist jedoch, die relativ hohe Rohstoffinanspruchnahme in GreenLife, welche deutlich über dem Bedarf in GreenMe und GreenSupreme liegt. Hier wäre aufgrund der Szenariocharakteristik, insbesondere mit Blick auf die Bevorzugung von langlebigen und umweltschonenden Produkten und einem unterstellten allgemein höheren Umweltbewusstsein (vgl. Kapitel 3.5), ein nur marginal von GreenMe

<sup>71</sup> Eine Berechnung des tatsächlichen kumulierten Rohstoffaufwands konnte im Rahmen der Studie nicht erfolgen.



abweichender Wert erwartbar gewesen. Ausschlaggebend für die erhöhte Rohstoffinanspruchnahme in GreenLife im Vergleich zu GreenMe sind die in GreenMe unterstellten Annahmen zu Recyclingquoten, Materialeffizienz und der technologischen Entwicklung außerhalb Europas (vgl. Kapitel 3.4). Alle drei Aspekte wirken sich sowohl auf die zur Haushaltsführung genutzten Produkte und Geräte als auch auf die benötigten Materialien für beispielsweise Renovierungsarbeiten aus. Letzterer Aspekt ist auch der ergebnisrelevanter Einfluss, da bei Renovierungsarbeiten häufig Bedarf an Materialien auf mineralischer Basis wie beispielsweise Wand- und Bodenfliesen, Wandputz oder Gipskartonplatten besteht und diese eine hohe Masserelevanz in den Betrachtungen zur Rohstoffinanspruchnahme haben. Dies zeigt sich auch darin, dass alle Szenarien im Vergleich zu GreenMe und GreenSupreme einen deutlich höheren Bedarf an nicht-metallischen Mineralien aufweisen. Dennoch lässt sich der Effekt des umweltbewussten Handelns zumindest indirekt im Vergleich der Szenarien GreenMe und GreenSupreme bzw. GreenLife und GreenEe2 erkennen. Erstere schließt dabei den überlagernden Effekt der geringeren Effizienz bei importierten Gütern aus (Annahme zur Entwicklung außerhalb Europas) und zeigt den Effekt des umweltbewussten Handelns daher nochmals deutlicher.

**Abbildung 5-48: Rohstoffinanspruchnahme pro Person im Jahr 2050 für das Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

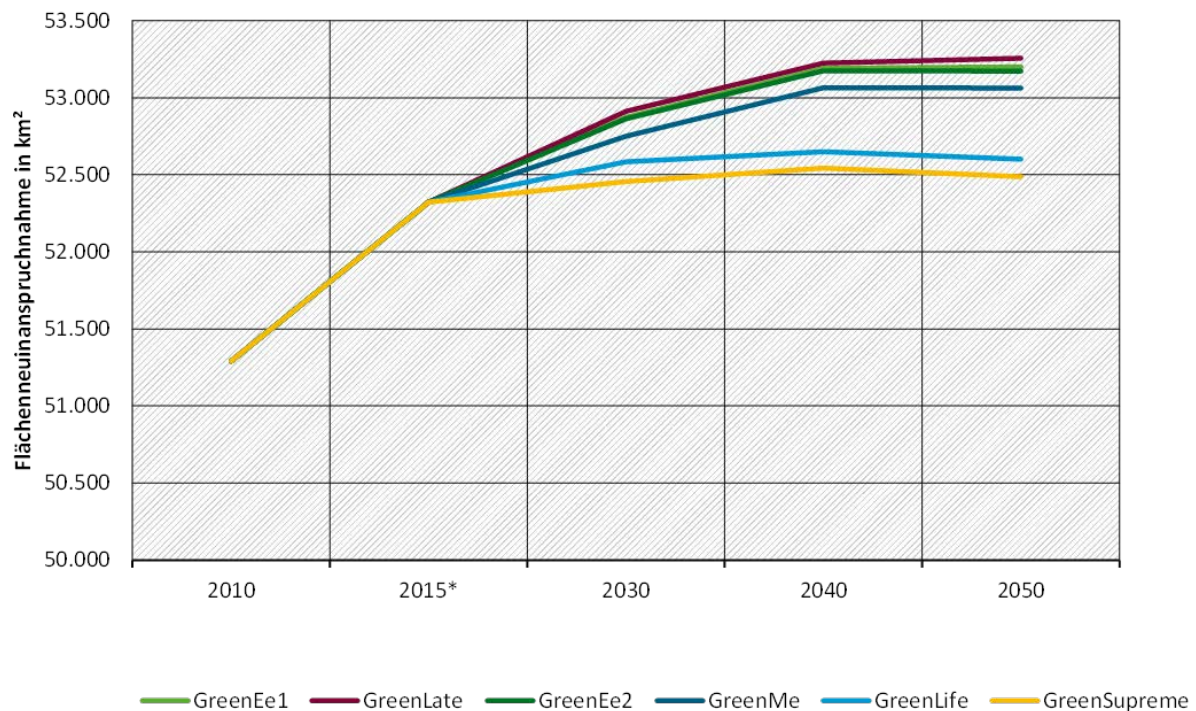
### Flächenneuanspruchnahme

Mit Blick auf die Flächenneuanspruchnahme variieren die Annahmen lediglich für die Szenarien GreenLife und GreenSupreme, die eine schnellere Reduktion des Flächenverbrauchs als die anderen Szenarien vorsehen (vgl. Kapitel 5.3.2). Dies ist auch in der Flächenneuanspruchnahme für Siedlung und Verkehr ersichtlich (Abbildung 5-49). In beiden Szenarien liegt diese 2050 rund 500 km<sup>2</sup> unter den Werten der anderen Szenarien. Auffällig ist,

dass trotz gleicher Annahmen zur Flächenneuanspruchnahme sowohl GreenLife und GreenSupreme als auch GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenMe unterschiedliche Flächeninanspruchnahmen aufweisen. Während die Entwicklung der Flächen für Wohnbau, Industrie/Gewerbe, Erholung und sonstigen Siedlungsflächen sowie der Verkehrsfläche sich in den Szenarien mit gleicher Annahme bezüglich der Flächenneuanspruchnahme identisch entwickeln, variiert jedoch die Inanspruchnahme für die sogenannten Betriebsflächen (Abbildung 5-50).

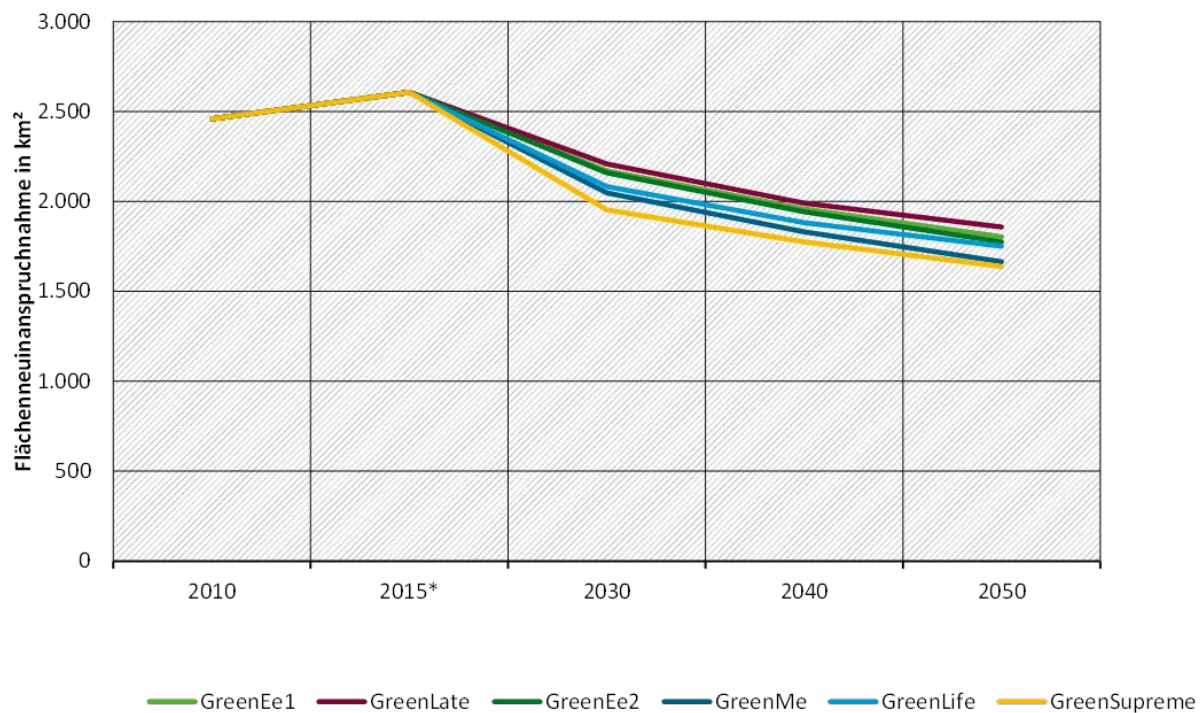
Hierunter wird auch das sogenannte Abbauland, also die Fläche zur Gewinnung von beispielsweise Sand, Kies, Kohle oder Steinen, und Haldenflächen zur dauerhaften Lagerung von beispielsweise Schlacken und Schutt, sowie unbebaute Lagerplätze zur zeitweisen Lagerung von Gütern gezählt (Statistisches Bundesamt, 2010). Und eben jene Betriebsflächen variieren in ihrer Entwicklung entsprechend der Szenariencharakteristika und der entsprechenden Annahmen zur Produktion von Gütern und dem Bedarf an Baustoffen wie Sand und Kies, die überwiegend in Deutschland gewonnen werden. Dies erklärt auch warum bei der Betrachtung der Betriebsfläche GreenMe eine stärkere Reduktion aufweist als GreenLife.

**Abbildung 5-49: Vergleich der Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr**



Hinweis:\* Aufgrund einer methodischen Umstellung sind Werte nach 2015 nur bedingt mit Werten vor 2016 vergleichbar. Daher wird hier 2015 als aktueller Wert dargestellt.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und historischer Wert auf Basis von (Statistisches Bundesamt, 2015b)

**Abbildung 5-50: Entwicklung der Betriebsfläche in den Green-Szenarien**

Hinweis: \* Aufgrund einer methodischen Umstellung sind Werte nach 2015 nur bedingt mit Werten vor 2016 vergleichbar. Insbesondere die Ausweisung der Betriebsfläche ist nach 2015 nicht mehr möglich. Daher wird hier 2015 als aktueller Wert dargestellt.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und historischer Wert auf Basis von (Statistisches Bundesamt, 2015b)

### 5.3.7 Schlussfolgerungen für den Transformationspfad

Die Energieeffizienz des Gebäudebestands nimmt eine Schlüsselrolle ein. Sogar in GreenLate, in welchem in deutlich geringerem Ausmaß Energieeffizienzmaßnahmen unterstellt werden, sinkt der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser von 2015 um 45 % bis 2050. In den anderen Green-Szenarien wird eine Reduktion zwischen 64 % und 69 % erreicht. Zur Umsetzung sind folgende Schritte erforderlich:

- Die Sanierungsrate ist schnell auf mindestens das Zweieinhalbfache des heutigen Niveaus von 1 % zu erhöhen. Derart große Steigerungen sind nur zu erreichen, wenn zeitnah sehr wirksame politische Instrumente integriert werden. Möglichkeiten hierfür sind, die Klimakosten von fossilem CO<sub>2</sub> bei den Brennstoffpreisen zu integrieren, gemeinsam mit weiteren klimagerechten Steuerungsinstrumenten. Beispielsweise ein „Gebäude-Klimaabgabe mit Förderanspruch“ vorgeschlagen, speziell um auch dem Mieter-Vermieter-Dilemma entgegenzuwirken (Bürger et al., 2013). Da sich der Effekt einer gesteigerten Sanierungsrate nur sehr langsam auf den Gebäudebestand auswirkt, ist ein besonders schnelles Handeln zu deren Steigerung dringend geboten. Zusätzlich sind die politischen Maßnahmen und Instrumente so auszugestalten oder zu flankieren, dass sie die Wirtschaftlichkeit von Sanierungen sozialverträglich gestalten und ausreichende geschulte Fachkräfte sicherstellen.



- Aufgrund der langen Investitionszyklen besteht auch bei den Gebäudestandards – insbesondere bei der Sanierung – dringender Handlungsbedarf. Heute schon müssen diese weitestgehend den Anforderungen des Gebäudebestands im Jahr 2050 genügen. Es ist auch festzuhalten, dass der zunächst erhöhte Bedarf für Dämmmaterialien später durch Einsparungen von Rohstoffen zur Energieversorgung, zuerst fossiler Energieträger und danach Rohstoffen zum Aufbau des erneuerbaren Energiesystems, überkompensiert wird. Werden diese hohen Standards heute jedoch nicht umgesetzt, wird zur Erreichung des Zielzustands eine erneute und meist rein energetische Sanierung vor dem Jahr 2050 erforderlich. Dies verschlechtert die Wirtschaftlichkeit einer solchen Maßnahme stark, benötigt zusätzliche Rohstoffe und macht sie somit entweder unwahrscheinlich oder volkswirtschaftlich teuer. Alternativ wären mehr erneuerbare Energien bereit zu stellen und damit verbunden höhere Rohstoffaufwendungen nötig.

Alle Energiemengen, welche trotz ambitionierter Energieeffizienzmaßnahmen für den Gebäudebestand noch benötigt werden, müssen im Jahr 2050 durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden. In den Green-Szenarien basiert dezentrale Versorgung auf der besonders effizienten Technik der Wärmepumpe. Im dicht besiedelten urbanen Raum sind Wärmepumpen, die geothermische Umgebungswärme nutzen, oft nur eingeschränkt realisierbar. Für hohe Wärmebedarfsdichten sind insbesondere Wärmenetze gut geeignet, um die Gebäude mit erneuerbarer Wärme zu versorgen. Um erfolgreich einen energetisch und rohstofflich effizienten Fuel-Switch zu ermöglichen, sind folgende Schritte erforderlich:

- Schnelles Handeln zur Reduktion des Raumwärmebedarfes hebt Synergien zur Integration besonders effizienter erneuerbarer Technik zur Wärmeversorgung und im urbanen Raum zur Integration von erneuerbarer leitungsgebundener Wärmeversorgung. Dies macht einen erfolgreichen Fuel-Switch hin zur Bereitstellung der Wärmebedarfe des Gebäudebestands durch erneuerbare Energien möglich.
- Es bedarf paralleler Maßnahmen, die konventionellen Heiztechniken und Nutzung fossiler Brennstoffe in den kommenden Jahren zu reduzieren. Es ist notwendig, zeitnah keine neuen Ölheizungen und in der Dekade nach 2030 auch keine neuen Gasheizungen mehr zu installieren. Auch hier könnte die Integration der Umweltkosten von fossilem CO<sub>2</sub> bei den Brennstoffen eine Möglichkeit sein, ergänzend zu den ordnungsrechtlichen Instrumenten. Jegliche Förderungen von auf fossilen Brennstoffen basierenden Heiztechniken müssen umgehend beendet werden.
- Die Auswirkungen von verzögertem oder weniger ambitioniertem Handeln bei den Sanierungen und Modernisierungen werden in GreenLate deutlich. Wie in Abbildung 5-43 zu erkennen, verbleiben 2050 trotz der gesteigerten Sanierungsrate noch Gas-Heizungen in der dezentralen Versorgung. Zwar ist mit der Nutzung von PtG eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung möglich, bei welcher ein geringer Investitionsaufwand bei den Heiztechniken und Transformationsaufwand entsteht. Dennoch gehen damit eine geringere Effizienz, höhere Betriebskosten, höhere volkswirtschaftliche Kosten (ifeu et al., 2018) sowie höhere Energie- und Rohstoffbedarfe in der Energieversorgung zur Bereitstellung dieses Energieträgers einher. Ein Festhalten an konventionellen Techniken erscheint daher nicht zielorientiert.



- ▶ Derzeit werden über 85 % der erneuerbaren Wärme mittels Biomasse gedeckt, dieser hohe Anteil lässt sich nicht nachhaltig in die Zukunft fortschreiben (BMW, 2018). Aus Gründen der Ressourcenschonung sollte die Nutzung von Holz vor allem stofflich erfolgen. Dezentrale Biomassenutzung verursachen zudem meist hohe lokale Emissionen von Feinstaub und anderen Luftschadstoffen. Entsprechend wird die energetische Nutzung von Biomasse für die Raum- und Warmwasserbereitstellung in allen Green-Szenarien schrittweise vermieden.
- ▶ Flankierend sind besonders effiziente dezentrale Heiztechniken wie Wärmepumpen zu fördern. Dies gilt sowohl für Erdwärmesonden, als auch für effektive Luftwärmepumpen in energieeffizienten Häusern, wo hohe Jahresarbeitszahlen erreicht werden können. Erdwärmepumpen sind aus volkswirtschaftlicher Sicht auf Grund ihrer höheren Effizienz zu bevorzugen, sind jedoch mit höheren Anschaffungskosten verbunden. Die zusätzlichen Investitionskosten wirken als Hemmnis, selbst wenn sie sich über die Lebensdauer amortisieren können (Fiedler et al., 2019). Dem muss mit einer stärkeren Förderung von Erdwärmepumpen entgegengewirkt werden, um die vollen Effizienzpotentiale zu heben.
- ▶ In urbanen Räumen ist die leitungsgebundene Wärmeversorgung wirtschaftlich attraktiv und treibhausgasneutral zu gestalten. Zukunftsfähig sind moderne und flexible Strom-Wärme-Systeme, bspw. in Kombination mit Großwärmepumpen. Bisher ist der Förderrahmen für Großwärmepumpen sehr beschränkt, so dass diese effiziente Technik im Vergleich zur gut geförderten fossilen KWK sehr unattraktiv ist.
- ▶ Wärmenetze bieten die Möglichkeit unterschiedliche Wärmequellen im urbanen Raum nutzbar zu machen: Gas-KWK (verbunden mit Groß-Wärmepumpen, Solarthermie und Power to Heat), Quartiers-Wärmepumpen (welche lokale Netze versorgen), Müllverbrennung und Geothermie. Einen ersten Ansatz zur Förderung einer Temperaturabsenkung – um erneuerbare Energien besser durch Wärmenetze nutzbar zu machen – bietet das Förderprogramm „Modellvorhaben Wärmenetzsysteme 4.0“. Hier sind stetige Weiterentwicklung und Ausweitung erforderlich. Vor dem Hintergrund langer Projektentwicklungs- und Bauphasen von Wärmenetzen besteht auch hier weiterhin dringender politischer Handlungsbedarf.
- ▶ Um den Beitrag der Wärmenetze zu realisieren, ist ein Ausbau der Wärmenetze notwendig, dass bedeutet sowohl Erweiterung und Nachverdichtung von bestehenden Wärmenetzen als auch Neubau von Wärmenetzen. Deren finanzielle Förderung ist heute über das KWKG noch sehr stark an die fossilbefeuerte KWK gebunden. Die Förderung leitungsgebundener Wärmeinfrastruktur sollte stattdessen in Zukunft an der Einbindung von Wärme aus erneuerbaren Energien ausgerichtet sein.
- ▶ Sofern die Versorgung der Wärmenetze nicht durch erneuerbare Wärme substituiert werden kann, müssen moderne und flexible KWK-Systeme integriert werden. Moderne KWK-Systeme verbinden eine Strom-Wärme-gekoppelte Brennstoffeuerung mit systemflexibilisierenden und effizienten Techniken der erneuerbaren Wärmebereitstellung wie Solarthermie, Power to Heat und Großwärmepumpen. Zur Versorgung dieser modernen KWK-Anlagen kommt treibhausgasneutrales synthetisches Gas aus PtG zum Einsatz. Die

Vorschläge der WSB-Kommission und die in 2017 eingeführte Förderung von innovativen KWK-Systemen sind Ansätze diese notwendige Umstellung in der Rolle und Ausgestaltung der KWK einzuleiten.

Vor dem Hintergrund der derzeitigen Diskussionen zum Wohnraumbedarf und Mietsteigerungen sehen die Szenarien, insbesondere GreenLife und GreenSupreme, eine sehr ambitionierte und diskussionswürdige Entwicklung des Wohngebäudebestandes und der Wohnfläche vor. Diese zeigen aber auch, dass trotz zunächst weiter wachsenden Wohngebäudebestandes Art und Umfang zukünftiger Bauaktivitäten eine hohe Relevanz für die Reduktion des Rohstoffbedarfs aufweisen. So reduzieren Materialsubstitutionen, beispielsweise durch verstärkten Holzbau, neben dem verstärkten Einsatz von Sekundärmaterial den Rohstoffkonsum deutlich. Auch die Reduktion der Wohnfläche pro Kopf stellt eine Stellschraube dar.

- ▶ Der hochwertige Einsatz von Recyclingbaustoffen insbesondere auch im Hochbau sollte konsequent gefördert, bestehende Hemmnisse beseitigt und die entsprechenden gesetzlichen Voraussetzungen geschaffen werden. Zudem gilt es die entsprechende Forschungsförderung fortzuführen. Hierzu zählen auch die weitere Verbesserung der getrennten Erfassung, des selektiven Rückbaus und die verbesserte sortenreine Trennung, Sortierung und Homogenisierung der einzelnen Bauschuttfractionen für das Recycling (vgl. auch (UBA, 2016d)).
- ▶ Der verstärkte Holzbau, insbesondere auch im mehrgeschossigen Wohnungsbau, verspricht positive Effekte für den Klima- und Ressourcenschutz. Die Bundesregierung sollte ihre Forschungs- und Beratungsaktivitäten zum Holzbau, u. a. im Rahmen der Charta für Holz 2.0, fortführen. Hierbei gilt es aber verstärkt auch mögliche negative ökologische Wirkungen in den Blick zu nehmen. Insbesondere bestehen Unklarheiten bezüglich der Holzverfügbarkeiten vor dem Hintergrund des notwendigen Waldumbaus und den Effekten der Verschiebungen zwischen Wald- und Holzproduktspeicher für den Klimaschutz. Eng damit verbunden ist auch die Frage des zukünftigen Einsatzes von Laubhölzern im Bausektor, hier besteht dringender Forschungsbedarf.
- ▶ Flächensparendes Bauen, Innenentwicklung sowie Flächenrecycling reduzieren die Flächenneuanspruchnahme und steigern die Effizienz der Flächennutzung im Sinne einer konsequenten Umsetzung und ambitionierten Fortschreibung der Ziele der Bundesregierung und führen zu deutlichen Rohstoffeinsparungen insbesondere im Tiefbau. Sie sind daher entsprechend zu fordern und zu fördern (siehe auch (Adrian et al., 2018)). Dies gilt auch und insbesondere in kleineren Städten und ländlichen Gemeinden, in denen die Flächenneuanspruchnahme bezogen auf die Zahl der Einwohner höher ist als in den großen Städten.
- ▶ Mit dem deutlich steigenden Anteil an Geschoßwohnungsbau und modularer Bauweisen zeigen GreenLife und GreenSupreme Möglichkeiten auf, wie eine Reduktion des Wohnflächenbedarfs erreicht werden kann und tragen zudem dem aktuellen Trend der Urbanisierung und des Wachstums der Ballungsräume, vor allem der Universitätsstädte, in besonderer Weise Rechnung. Auch aus diesem Grund sollte die Innenentwicklung und Flächenrecycling sowie die Effizienz der Flächennutzung konsequent vorangebracht werden.

Auch sind Initiativen für neue Wohnkonzepte und modulares Bauen verstärkt zu unterstützen.

## 5.4 Mobilität

Der Verkehr hat in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten stetig zugenommen: Seit 1960 hat sich der Personenverkehr vervierfacht und der Güterverkehr mehr als verdreifacht. Vor allem dem Güterverkehr wird zukünftig ein weiterer starker Zuwachs prognostiziert. Grund hierfür sind die arbeitsteiligen Produktions- und Logistikprozesse und die zunehmend globalisierten Handelsverflechtungen. Trotz aller spezifischen Effizienzsteigerungen der Verkehrsträger – also sinkendem Energiebedarf pro Personen- oder Tonnenkilometer – überkompensiert das Verkehrswachstum die bisherigen Erfolge. Mit Stand 2017 verzeichnete der Verkehr mit 168 Mio. t CO<sub>2</sub>Aq als einziger Sektor höhere THG-Emissionen als im Jahr 1990. Damit verursachte der Verkehr im Jahr 2017 18,5 % der THG-Emissionen in Deutschland – Tendenz steigend (BMU, 2019b).

Der Schlüssel zur Gestaltung eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Verkehrs liegt in einer Kombination aus Verkehrswende mit Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz sowie einer Energiewende im Verkehr – also der vollständigen Abkehr von fossilen Energieträgern (Adlunger et al., 2013). Die Verkehrswende senkt den Energieverbrauch des Verkehrs und damit den Bedarf an erneuerbaren Energien im Verkehr und ermöglicht so erst eine Energiewende. Beides muss also Hand in Hand gehen, da eine Energiewende umso teurer wird, je mehr Energie der Transportsektor absolut benötigt.

**Abbildung 5-51. Zusammenspiel von Verkehrswende und Energiewende im Verkehr zur vollständigen Minderung der THG-Emissionen 2050**



Quelle: eigene Darstellung nach (Bergk et al., 2016)

Die internationale Luft- und Seeschifffahrt werden in den Szenarien mitbetrachtet, jedoch werden deren THG-Emissionen nach der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) nicht den nationalen Inventaren zur Berichterstattung zugerechnet. Konsequenter

Klima- und Ressourcenschutz auf nationaler Ebene bedeutet jedoch, auch den eigenen Beitrag zu den internationalen Verkehren in den Blick nehmen<sup>72</sup>.

## **5.4.1 Bausteine der Transformation im Verkehr**

### **5.4.1.1 Verkehrswende**

Maßnahmen der Verkehrswende umfassen die Bereiche Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz. Nur mittels eines integrierten Ansatzes mit einem Mix von Maßnahmen kann das Ziel eines nachhaltigen Verkehrs erreicht werden. Dabei kommt es nicht nur auf Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz von Antrieben an, sondern vor allem auch auf sogenannte nicht-technische Maßnahmen. Notwendig sind hier vor allem ökonomische Anreize und eine integrierte Siedlungs- und Verkehrsplanung, die auf die Vermeidung von Verkehren und die Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsträger zielt.

Maßnahmen und Instrumente der Verkehrswende können den Endenergieverbrauch und die THG-Emissionen des Verkehrs bis 2050 gegenüber 1990 – je nach Umsetzungstiefe – zwischen 40 % und maximal 60 % reduzieren, siehe dazu Abbildung 5-51 (Bergk et al., 2016). Mit Blick auf Rohstoffbedarf, Umweltwirkungen und Kosten ist eine solche Senkung des Energieverbrauchs für eine Dekarbonisierung des Verkehrs als Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung in einem treibhausgasneutralen Deutschland zwingend erforderlich. Eine Verkehrswende allein reicht jedoch nicht aus, die THG-Neutralität im Verkehr zu erreichen. Als weiterer Baustein muss der Verkehr durch eine Energiewende im Verkehr vollständig auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt werden.

### **5.4.1.2 Energiewende im Verkehr**

In der Energiewende im Verkehr sind Verbrennungsmotoren – soweit technisch möglich – durch elektrische Antriebe zu ersetzen und fossile Kraftstoffe schrittweise durch treibhausgasneutrale zu substituieren.

Der Vorrang einer Elektrifizierung der Verkehrsmittel ergibt sich aufgrund der höheren Energie- und Kosteneffizienz im Vergleich zur Verwendung von treibhausgasneutralen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen (UBA, 2016c). Deshalb ist es sinnvoll, entsprechende Effizienzpotenziale durch die Elektrifizierung möglichst weitgehend zu realisieren, bevor zur Deckung des verbleibenden Bedarfs die aufwändigere Umstellung auf treibhausgasneutrale Kraftstoffe (im Wesentlichen auf Power to Liquid (PtL)) erfolgt. Biogene Kraftstoffe können aufgrund begrenzter Mengenpotentiale, bestehender Nutzungskonkurrenzen um die Biomasse, fehlender vollständiger THG-Neutralität und alternativer Verwendungsmöglichkeiten nur gering zur Energieversorgung des Verkehrs beitragen (Schmied et al., 2015).

Vor dem Hintergrund der langfristig benötigten hohen Bedarfe an treibhausgasneutralen, flüssigen Kraftstoffen erfolgt diese Transformation gleichzeitig mit der Elektrifizierung der Verkehrsmittel. Jedoch gibt es viele Bereiche des Verkehrs, die auch zukünftig nicht oder nur teilweise elektrifiziert werden können, wie etwa der internationale See- und Luftverkehr (Schmied et al., 2015). Hier spielen dann treibhausgasneutrale Kraftstoffe die zentrale Rolle auf dem Weg zur Dekarbonisierung des Verkehrs (Schmied et al., 2015; UBA, 2016c). Tabelle 5-20 zeigt die tragende Rolle der direkten Elektrifizierung als treibhausgasneutrale Energieversorgungsoption für landgebundene Verkehrsmittel im Allgemeinen sowie bezüglich

---

<sup>72</sup> Andere klimarelevante Emissionen als die THG gemäß Kyoto-Protokoll werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Hinsichtlich der internationalen Verkehre sind also die Klimawirkungen aus Black Carbon-Emissionen (Schiffe) sowie aus den Emissionen von NO<sub>x</sub>, Wasserdampf und Aerosolen (Flugzeuge) nicht betrachtet.



der Umsetzung in den Green-Szenarien. PtG Wasserstoff spielt hingegen keine Rolle und flüssige synthetische Kraftstoffe (PtL) sind nur für luft- und wassergebundene Fahrzeuge sowie – zumindest als Zweitkraftstoff – bei Oberleitungshybrid-Lkw im Fernverkehr relevant (Schmied et al., 2015; UBA, 2016c).<sup>73</sup>

**Tabelle 5-20: Übersicht postfossiler Energieversorgungsoptionen**

Verkehrsmittel	Strom: Batterie (inkl. Plug-in-Hybride)	Strom: Oberleitung	PtG-Wasserstoff oder PtG-Methan	PtL
Pkw / LNF / Lkw im Nahverkehr	✓			
Lkw im Fernverkehr	✓	✓	(✓)	✓
Busse	✓			
Bahn	✓			
Flugzeug				✓
Seeschifffahrt			(✓)	✓

✓ - In dieser Option je nach Szenario berücksichtigt (✓) - Technisch alternativ möglich, jedoch nicht berücksichtigt.

Quelle: eigene Darstellung

#### 5.4.2 Lösungsräume für den Transformationsprozess in der Mobilität

Mobilität betrifft sowohl die Mobilität von Personen als auch den Transport von Waren. Entsprechend sind die Einflussfaktoren auf die THG-Emissionen und die Rohstoffaufwände und deren Treiber im Güter- und Personenverkehr zu finden. Im Personenverkehr sind dies beispielsweise die Wegeanzahl und Wegelängen, das genutzte Verkehrsmittel sowie die Auslastung. Im Güterverkehr spielen die Transportmengen, die sich aus Produktion sowie Im- und Exportmengen ergeben, die Transportweiten, das genutzte Transportmittel und die Auslastung die entscheidenden Rollen. Die THG-Emissionen ergeben sich im Personen- und Güterverkehr als Produkt der Verkehrsleistung (gemessen in Personen- oder Tonnenkilometern), des spezifischen Energiebedarfs und der THG-Intensität des genutzten Energieträgers.

Entsprechende Maßnahmen zum Klimaschutz setzen über diese Wirkkette an, um eine Minderung im Bereich Mobilität und auch im Gesamtsystem zu erreichen. Wie auch in anderen Anwendungsbereichen existieren im Verkehr verschiedene Ansätze, die Klimawirkung zu verringern, diesen bis 2050 treibhausgasneutral zu gestalten und gleichzeitig Ressourcen zu schonen. Über die allgemeine Szenarienbeschreibung (siehe Kapitel 3.1) hinaus werden hier als Lösungsräume für die Transformation die wichtigsten verkehrsspezifischen Festlegungen je Szenario kurz beschrieben, ausgewählte Besonderheiten genannt und dies in Tabelle 5-21 zusammengefasst<sup>74</sup>.

<sup>73</sup> Flugzeuge und Schiffe legen zwischen ihren Stopps gewöhnlich große Distanzen zurück, sie müssen also bei Abfahrt bzw. Abflug sehr viel Energie an Bord haben. Das ist mit heutiger Technik und aufgrund der räumlichen Restriktionen nur mit flüssigen Kohlenwasserstoffen möglich. Zwar gibt es Forschungsaktivitäten, die langfristig auf elektrisches Fliegen abzielen. Das erscheint für die mittleren und langen Distanzen jedoch nur möglich, falls die Energiedichten der Akkus stark erhöht werden können. Solche Technologiesprünge sind in dieser Studie und für die Zeit bis 2050 nicht angenommen. Für die zukünftige Seeschifffahrt zeichnet sich noch keine eindeutig vorteilhafte Antriebs- und Energieversorgungsoption ab (Cames, 2019). Für beide Verkehrsträger, Seeschiffe und Flugzeuge, unterstellen wir in dieser Studie eine Energieversorgung mit PtL.

<sup>74</sup> Detaillierte Annahmen zu den Szenarien sind den Forschungsberichten zu entnehmen.

In den GreenEe-Szenarien (GreenEe1 und GreenEe2) wird im Zeitverlauf früh sehr stark auf Energieeffizienz gesetzt. Gleichzeitig wird im Personenverkehr eine starke Vermeidung (weniger und kürzere Wege) und Verlagerung auf klimaverträgliche Verkehrsmittel erreicht. Außerdem verbessert sich die Effizienz konventioneller Fahrzeuge stark. Besonders energieeffiziente batterie-elektrische Pkw werden schnell in den Markt gebracht und erreichen hohe Anteile im Bestand. Der Güterverkehr ist durch eine starke Verlagerung auf die Schiene und die Nutzung von Oberleitungen auf wichtigen Autobahnen durch ebenfalls sehr energieeffiziente Oberleitungshybrid-Lkw (OH-Lkw) gekennzeichnet. Die technische Effizienz von Flugzeugen und Seeschiffen verbessert sich um ca. 2 % pro Jahr. Insgesamt ergibt sich damit ein hohes Ambitionsniveau des Klimaschutzes im Transformationspfad bis zum Jahr 2050.

Im Szenario GreenLate werden die Potentiale zur Vermeidung und Verlagerung nicht so stark genutzt. Die Effizienz von Pkw und Lkw verbessert sich bis zum Jahr 2050 langsamer und ist selbst im Jahr 2050 noch geringer als in allen anderen Szenarien. Elektrofahrzeuge verbreiten sich bei Pkw erst später, auch wenn in 2050 ähnliche Bestandsanteile wie in den anderen Szenarien erreicht werden. Auf den Aufbau eines Oberleitungsnetzes für OH-Lkw wird verzichtet. Aus diesem Grund kommen im Güterverkehr nur wenige und auch nur teilelektrifizierte Lkw (extern aufladbare hybridelektrische Lkw, PHEV) zum Einsatz. Die technische Effizienz von Flugzeugen und Seeschiffen verbessert sich nur um rund 1 % pro Jahr, was den Prognosen der Hersteller für die nächsten zwei Dekaden entspricht. Das Ambitionsniveau zum Klimaschutz im Transformationspfad bis zum Jahr 2050 ist damit deutlich geringer und die Erreichung der sehr hohen THG-Minderung macht den Einsatz größerer Mengen strombasierter Kraftstoffe notwendig. Das führt zu einem hohen Endenergiebedarf.

GreenMe hat auch im Verkehr das Ziel mit möglichst geringer Rohstoffinanspruchnahme sehr hohe THG-Minderungen in einem ambitionierten Pfad zu erreichen und dabei Rohstoffe effizient zu nutzen. Das Szenario ist durch eine starke – teilweise sehr starke – Verkehrsvermeidung und -verlagerung im Güter- und Personenverkehr gekennzeichnet. Ein verstärkter Leichtbau (Kapitel 5.4.7.1) im Pkw-Bereich und kleinere Akkus in Elektro-Pkw ermöglichen einen geringen Energieverbrauch. Im Güterverkehr auf der Straße kommen teilweise batterie-elektrische Oberleitungs-Lkw (bevOH) zum Einsatz, um weniger strombasierte Kraftstoffe einsetzen zu müssen und damit Ressourcen im Bereich von deren Herstellung einzusparen.

GreenLife setzt im Rahmen eines hohen Ambitionsniveaus der Klimaschutzanstrengungen im Transformationspfad zusätzlich zu den GreenEe-Szenarien insbesondere auf Änderungen der Verhaltensweise in der persönlichen Mobilität und auch auf teilweise regionalisierte Wirtschaftskreisläufe. Die Änderungen im persönlichen Mobilitätsverhalten betreffen vor allem die urbane Bevölkerung und bedeuten bei diesen unter anderem die geteilte Nutzung von Fahrzeugen (insbesondere durch Ridesharing<sup>75</sup>) sowie eine gezielte Entwicklung der Städte in Richtung einer "Stadt und Region der kurzen Wege" (Beckmann et al., 2011). Auch bei den verbleibenden privaten Pkw bzw. Carsharing-Pkw gibt es einen Trend zu kleineren Fahrzeugen. Insbesondere im Luftverkehr kommt es zu deutlichen Änderungen des Nutzungsverhaltens, da weniger private und geschäftliche Reisen stattfinden. Das bis zum Jahr 2050 sehr gut ausgebaute und leistungsfähige Hochgeschwindigkeitsnetz der Bahn übernimmt den Transportbedarf, der heute noch durch innerdeutsche Flüge gedeckt wird, vollständig.

GreenSupreme kombiniert die verschiedenen Ansätze aus GreenEe, GreenMe und GreenLife, d. h. eine schnelle und starke Elektrifizierung, eine hohe Rohstoffeffizienz, die weitest gehende Verbesserung der Energieeffizienz sowie die in GreenLife beschriebenen massiven Änderungen

---

<sup>75</sup> Ridesharing bezeichnet die simultane, gemeinschaftliche Nutzung eines Fahrzeugs (gleichzeitige Nutzung). Dagegen umfasst Carsharing die sequentielle, geteilte Nutzung eines Fahrzeugs (nicht gleichzeitige Nutzung). Beide Mobilitätsformen können kommerziell oder privat angeboten werden.

im Mobilitätsverhalten. Dies führt zu einer noch geringeren Rohstoffinanspruchnahme bei gleichzeitig sehr hohem Ambitionsniveau der Anstrengungen zur THG-Vermeidung im Transformationspfad. Verstärkter Leichtbau und kleinere Akkus bei Pkw sowie batterieelektrische OH-Lkw finden ebenso Anwendung wie die „Stadt und Region der kurzen Wege“ mit weit verbreitetem Ride- und Carsharing. Die Rohstoffe aus Akkus werden gezielt stärker recycelt.

**Tabelle 5-21: Überblick der Szenarien im Bereich Verkehr**

	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
<b>Änderung des persönlichen Mobilitätsverhaltens*</b>	hoch	mittel	hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch
<b>Verkehrsverlagerung im Güterverkehr</b>	sehr hoch	hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
<b>Effizienzverbesserung bei Fahrzeugen</b>	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
<b>Umstellung auf elektrische Antriebe</b>	hoch	mittel	hoch	hoch	hoch	sehr hoch
<b>Elektrifizierung im Güterverkehr</b>	OH-Lkw	kein OH-Lkw	OH-Lkw	OH- und bev-OH-Lkw	OH-Lkw	OH- und bev-OH-Lkw

\*Durch Wahl des Verkehrsmittels, der Fahrzeuggröße sowie des Wohn- und Arbeitsorts.

#### **TextBox 5-6: Verkehre im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen**

Baumaschinen, landwirtschaftliche und militärische Fahrzeuge werden dem Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) zugeordnet. In der KSP-Systematik erfolgt eine Zuteilung in den Sektor Landwirtschaft und in den Sektor Gebäude, siehe Kapitel 6.1.1.

Generell sind auch in diesem verkehrlichen Bereich gewisse Maßnahmen der Verkehrswende (Vermeidung von Verkehr und Effizienz) umsetzbar und die für den Verkehrsbereich beschriebenen Maßnahmen der Energiewende anwendbar. In allen Green-Szenarien wird keine Elektromobilität für diese Anwendungen unterstellt, sondern es wird von einer Substitution der fossilen Kraftstoffe durch PtL ausgegangen. Eine detaillierte Betrachtung dieser Maschinen und Fahrzeuge erfolgt nicht.

### **5.4.3 Verkehrsleistung**

Die Verkehrsleistungen – gemessen in Personenkilometern (Pkm) – werden für den Personenverkehr in den Green-Szenarien für folgende Verkehrsarten ausgewiesen: Motorisierter Individualverkehr (MIV), aufgeteilt nach Alltags- und Fernverkehr, Öffentlicher Personenverkehr (ÖPV), aufgeteilt nach öffentlichem Nah- (ÖPNV) und öffentlichem Fernverkehr (ÖPFV), Rad- und Fußverkehr sowie Luftverkehr. Im Güterverkehr beschränkt sich die Darstellung der Verkehrsleistung – gemessen in Tonnenkilometern (tkm) – auf die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße bzw. die Verkehrsmittel Lkw, Bahn und Binnenschiff sowie Seeverkehr. Die Luftfracht spielt hier nur eine marginale Rolle und findet

keine Berücksichtigung<sup>76</sup>. Die Deutschland zuzurechnenden Anteile des internationalen Luftverkehrs und des internationalen Seeverkehrs werden nachrichtlich mitgeführt.

#### **5.4.3.1 Personenverkehr national**

Die Höhe der Personenverkehrsleistung in Deutschland wird in den Green-Szenarien dadurch bestimmt, inwieweit Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung (weniger Wege und kürzere Wege) und Verkehrsverlagerung (auf Fuß-/Radverkehr und den öffentlichen Verkehr) wirken. Dabei lassen sich die Szenarien in drei Gruppen einteilen: die beiden GreenEe-Szenarien und das GreenMe-Szenario entsprechen den Verkehrsleistungen des Klimaschutzszenarios der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ (Bergk et al., 2016). GreenLate verläuft im Unterschied dazu entsprechend dem Referenzszenario der gleichen UBA-Studie und realisiert ab 2030 nur die Hälfte der jährlichen Vermeidungs- und Verlagerungspotenziale des Klimaschutzszenarios der UBA-Studie (Bergk et al., 2016). In GreenLife und GreenSupreme entfalten sich über GreenEe und GreenMe hinaus noch weitreichendere Vermeidungs- und Verlagerungswirkungen.

Die Verkehrsentwicklung im Personenverkehr wird in GreenLife und GreenSupreme differenziert für die Bevölkerung im urbanen und im ländlichen Raum betrachtet. Für die Bevölkerung ländlicher Räume werden keine weitergehenden Veränderungen des Mobilitätsverhaltens über die GreenEe-Szenarien und dem GreenMe-Szenario hinaus angenommen. Grund hierfür sind die längeren Wegstrecken und die geringe zeitliche und räumliche Überschneidung dieser, so dass sich der Großteil der Wege sich nicht für Ridesharing eignet. Für die urbane Bevölkerung ändert sich jedoch das Mobilitätsverhalten bis zum Jahre 2050 in GreenLife und GreenSupreme. Hier prägen die „Stadt und Region der kurzen Wege“ sowie „geteilt“ genutzte Autos (Ridesharing und Carsharing) in Verbindung mit aktiver Mobilität (Rad und Fuß) und öffentlichem Verkehr (ÖPV) die städtische Mobilität. Dadurch werden die Potenziale zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung bis zum Jahr 2050 weitgehend erschlossen: Durch eine stärkere Siedlungsverdichtung nehmen die Wegeentfernungen ab. Zusammen mit der Zunahme des Radverkehrs sowie einer starken Verbreitung von Ridesharing („Pkw nutzen statt besitzen“) verringern sich so im Alltag die Pkw-Fahrleistungen in den Städten deutlich. Im urbanen Pkw-Alltagsverkehr erfolgt ab 2025 eine Verschiebung von Privat-Pkw hin zu Ridesharing, so dass bis zum Jahr 2050 kein signifikanter Besitz mehr von Privat-Pkw in Städten zu verzeichnen ist. Damit sinkt auch die Anzahl der Pkw je 1.000 Einwohner in Städten auf 150 Fahrzeuge (inkl. Ridesharing, Carsharing, Taxis) ((UBA, 2017b), S. 5). Dies entspricht etwa einem Drittel der heutigen Autodichte. Damit können die Mobilitätsbedürfnisse innerhalb der Stadt aber umfassend gedeckt werden.

Um diese aus heutiger Sicht neuen, innovativen Mobilitätsangebote wie Carsharing, Ridesharing und Carpooling erfolgreich in die bestehenden Systeme (insbesondere ÖPV) integrieren zu können, wird unterstellt, dass durch regulatorische Anpassungen Mobilität mit positiven Umweltauswirkungen bevorzugt Anwendung findet. Entscheidend sind hierfür eine Reduktion der Leerfahrten, ein hoher Besetzungsgrad und eine intensive Fahrzeugnutzung. Es wird angenommen, dass die Rahmenbedingungen zukünftig so gestaltet sind, dass die neuen Mobilitätsangebote sich nicht zulasten des ÖPV entwickeln, sondern in der Regel MIV Fahrten ersetzen. Dazu ist die Zulassung neuer kommerzieller Verkehrs- und Mobilitätsdienstleistungen mit Auflagen, vor allem Berichtspflichten, zu verbinden und auf Räume und Zeiten schwacher Nachfrage zu begrenzen (Karl et al., 2019).

---

<sup>76</sup> Bezüglich des Endenergieverbrauchs im Güterluftverkehr, wird der Luftverkehr separat betrachtet.



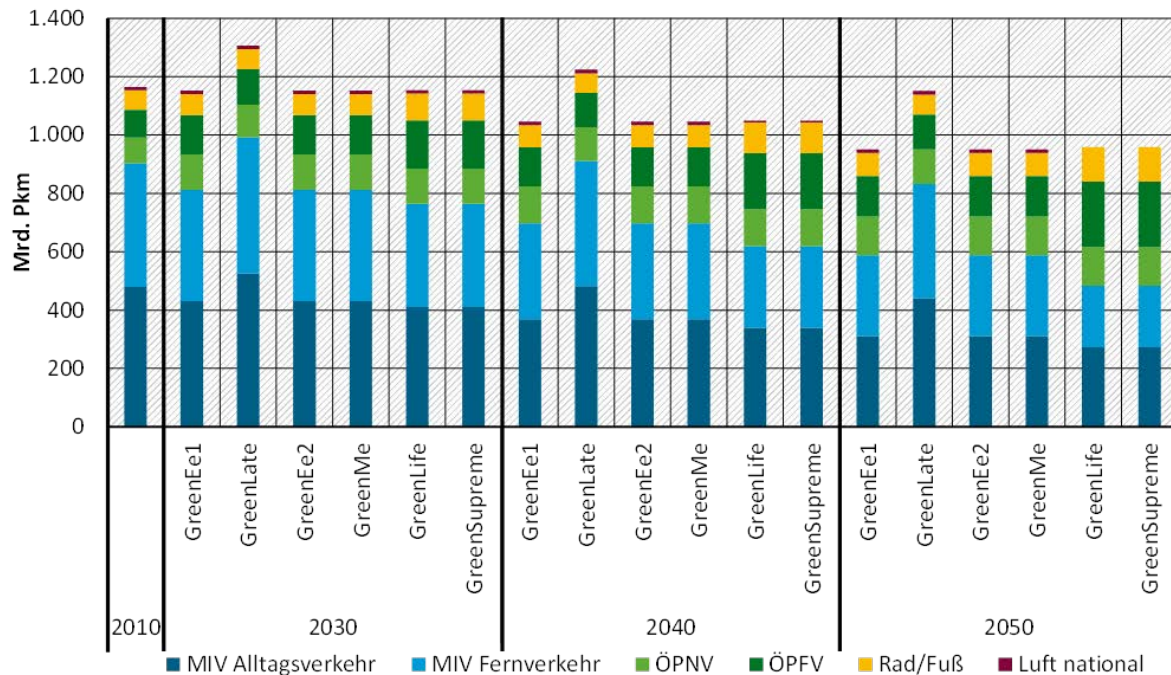
Auch im Fernverkehr der urbanen Bevölkerung ergeben sich in GreenLife und GreenSupreme maßgebliche Änderungen im Mobilitätsverhalten. Bis zum Jahr 2050 nutzt die urbane Bevölkerung zu 60 % den öffentlichen Personenfernverkehr (Bahn und Fernbus). Dieser Wert orientiert sich am Mobilitätsverhalten von Personen, die schon heute ohne eigenen Pkw leben. Fernfahrten mit dem Pkw erfolgen im Wesentlichen mit Carsharing-Fahrzeugen. Innerdeutsch finden im Jahr 2050 keine Flugreisen mehr statt – diese werden vollständig durch Bahn und Fernlinienbus übernommen. Die teilweise Substitution internationaler Urlaubsflüge durch Inlandsreisen (siehe Kapitel 5.4.3.3) bewirkt zusätzliche Reisen und damit zusätzliche Verkehrsleistung im Inland. Diese erfolgen entsprechend dem Modal-Split der übrigen inländischen Fernreisen.

Bis zum Jahr 2030 verzeichnen die Szenarien mit jeweils gleicher Ausprägung, also die Szenarien GreenEe und GreenMe sowie GreenLife und GreenSupreme, in Summe ähnliche Personenverkehrsleistungen. Diese liegen auf dem Niveau des Basisjahres 2010 mit rund 1.150 Mrd. Pkm. In GreenLate steigen hingegen die Verkehrsleistungen insgesamt, aber auch speziell im Straßenverkehr, deutlich auf rund 1.310 Mrd. Pkm an und liegen damit um 13 % höher als im Jahr 2010. Die Verkehrsleistungen im Personenverkehr liegen damit mit Ausnahme von GreenLate deutlich unter denen des Bundesverkehrswegeplans, die auf der „Verflechtungsprognose 2030“ (BMVI, 2014) des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) basieren (rund 1.330 Mrd. Pkm im Jahr 2030). Bezüglich der Aufteilung auf die Verkehrsmittel gibt es jedoch Unterschiede. So steigt beispielsweise der Anteil des Umweltverbunds (ÖPV und Rad/Fuß) von 22 % im Jahr 2010 auf 29 % in den GreenEe-Szenarien und GreenMe, auf 33 % in GreenLife und GreenSupreme und auf nur 23 % in GreenLate bis zum Jahr 2030. Gespiegelt nimmt der MIV-Anteil im Alltags- und Fernverkehr ab.

In der Entwicklung bis zum Jahr 2050 sinken die Personenverkehrsleistungen um 1 % (GreenLate) bzw. 18 % (andere Szenarien) gegenüber dem Jahr 2010. GreenLate weist mit rund 1.150 Mrd. Pkm den höchsten Wert aus, während die GreenEe-Szenarien und GreenMe mit rund 950 Mrd. Pkm sowie GreenLife und GreenSupreme mit rund 960 Mrd. Pkm, deutlich darunter liegen. Damit ist die Personenverkehrsleistung in GreenLate um 21 % höher als in den GreenEe-Szenarien und GreenMe. Die Modal-Split-Anteile des ÖPV, Rad- und Fußverkehrs steigen in allen Szenarien bis 2050 noch einmal deutlich an: GreenLate verzeichnet hier einen eher geringen Anstieg des Anteils auf 27 %. In den beiden GreenEe-Szenarien und in GreenMe steigt er auf 37 %. GreenLife und GreenSupreme erreichen mit 49 % einen sehr hohen Anteil des Umweltverbundes – siehe hierzu auch die Entwicklung der gemittelten Modal-Split-Anteile umweltfreundlicher Verkehrsarten in Abbildung 5-52 und auch Abbildung 5-55.

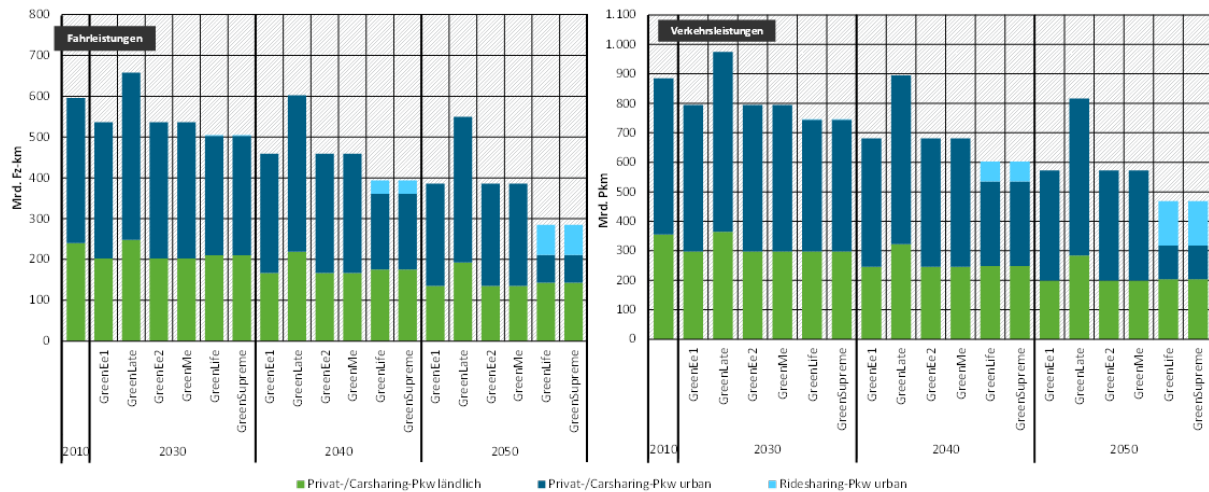
Im Einzelnen steigen in GreenLife sowie GreenSupreme von 2010 bis 2050 die Verkehrsleistungen im Rad- und Fußverkehr um 76 %. Der öffentliche Verkehr verdoppelt sich mit einem Anstieg um 93 % nahezu. Dabei steigt der ÖPFV (+ 133 %) stärker als der ÖPNV (+50 %). Aufgrund der Rückgänge der Gesamtverkehrsleistung durch Verkehrsvermeidung und deutliche Verlagerung auf den Umweltverbund sinkt die Verkehrsleistung des MIV im Fernverkehr um 50 %, im Alltagsverkehr um 43 % zwischen 2010 und 2050 (dadurch MIV gesamt -46 %).

Die Entwicklung der Personenverkehrsleistungen aufgeschlüsselt nach Verkehrsarten, wie sie in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde, ist in Abbildung 5-52 dargestellt.

**Abbildung 5-52: Entwicklung der Personenverkehrsleistung nach Verkehrsarten in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Abbildung 5-53 verdeutlicht die zunehmende Rolle von Ridesharing im urbanen Raum in den Szenarien GreenLife und GreenSupreme. Hinsichtlich Fahr- und Verkehrsleistung nehmen die Anteile, beginnend in 2030 leicht, ab 2040 deutlich zu, so dass im Jahr 2050 in Städten der überwiegende Teil der Pkw-Fahrten auf Basis von Ridesharing erfolgt. Der gegenüber der Fahrleistung höhere Anteil von Ridesharing an der Verkehrsleistung erklärt sich durch den höheren Besetzungsgrad der dafür genutzten Pkw gegenüber privaten oder Carsharing-Pkw. Die Marktdiffusion von Ridesharing-Pkw beginnt 2030 (siehe Kapitel 5.4.4.1 und Abbildung 5-59). Aufgrund der intensiven Nutzung ist der Anteil der Ridesharing-Pkw an den Neuzulassungen und am Bestand viel geringer als die Anteile an den Fahr- und Verkehrsleistungen. Im ländlichen Raum wird kein Ridesharing berücksichtigt, sondern nur die geteilte Nutzung von Pkw durch Carsharing.

**Abbildung 5-53: Entwicklung der Fahr- und Verkehrsleistung von Pkw nach Nutzungsart und Einsatzgebiet in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.4.3.2 Güterverkehr national

Die nationale Güterverkehrsleistung wird in allen Green-Szenarien auf Basis des umweltökonomischen Rohstoffmodells URMOD modellendogen berechnet. Damit spiegelt die Entwicklung des Güterverkehrs die Änderungen der Wirtschaftsentwicklung und Produktionsstrukturen in Deutschland und die damit verbundenen Änderungen der Gütertransportnachfrage wider. Die Transportnachfrage und deren Entwicklung in den verschiedenen Szenarien spiegeln sich am Ende neben der Verkehrsmittelwahl auch maßgeblich in der Verkehrsleistung im Güterverkehr wider.

Auch bezüglich der Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr ergeben sich zwischen den Szenarien Unterschiede. Für alle Green-Szenarien außer GreenLate werden die absoluten Transportmengen für Bahn und Binnenschiff als Transportpotenziale im Rahmen der oben beschriebenen Methodik aus dem Klimaschutzszenario der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ (Bergk et al., 2016) entnommen. Die mit dem Lkw transportierte Gütermenge ergibt sich aus der gesamten Transportmenge abzüglich der von Bahn und Binnenschiff transportierten Mengen. In GreenLate werden bis 2030 die absoluten Transportmengen für Bahn und Binnenschiff als Transportpotenziale aus dem Referenzszenario der gleichen Studie entnommen. Auch nach 2030 ergibt sich in GreenLate ein schwächeres Wachstum bei Schiene und Binnenschiff. Das jährliche Wachstum der beiden Verkehrsarten liegt nur bei 50 % des Wachstums der übrigen fünf Szenarien. In GreenLife und GreenSupreme trägt zusätzlich die Ausweitung von regionalen Wirtschaftskreisläufen bei Nahrungsmitteln im Binnentransport bis 2050 zu einer Verringerung der Transportentfernungen und damit auch zu einer zusätzlichen Minderung der Güterverkehrsleistung bei. Bei den anderen Gütergruppen wurden keine Änderungen angenommen.<sup>77</sup>

<sup>77</sup> Grund ist, dass für diese entweder bereits stark regionale Kreisläufe vorliegen (z. B. Baustoffe, Abfälle) oder aufgrund hoher Spezialisierung (Maschinenbau) bzw. Konzentration auf wenige Großstandorte (z. B. Fahrzeugbau, chemische Industrie) keine signifikante Regionalisierung möglich ist.

### TextBox 5-7: Modellendogene Berücksichtigung der Güterverkehrsmengen und Methodik zur Bestimmung der Verkehrsleistung

In den Green-Szenarien werden abweichend zu anderen Szenarienstudien und Projektionen in der Literatur die Güterverkehrsmengen modellendogen ermittelt. Dies bedeutet, dass die Güterverkehrsmengen differenziert nach Güterabteilungen (NST2007)<sup>78</sup> im Binnenverkehr, im Empfang und im Versand auf Grundlage der Entwicklung der transportrelevanten Produktionsmengen mit dem umweltökonomischen Rohstoffmodell URMOD berechnet werden. Damit werden die Gütermengen unmittelbar an die Entwicklungen der industriellen Branchen in den verschiedenen Szenarien gekoppelt. So werden auch Wechselwirkungen zu den anderen Bereichen im Güterverkehr berücksichtigt.

Dabei werden die zu transportierenden Mengen und Verkehrs- sowie Fahrleistungen güterabteilungsscharf über das umweltökonomische Rohstoffmodell (URMOD) makroökonomisch abgeleitet und anschließend den einzelnen Verkehrsträgern zugeordnet. Dies erfolgt vierstufig über das Transportaufkommen (Tonnage), den Modal Split (Verkehrsträger) sowie die Verkehrs- und die Fahrleistung. Die für die Berechnung der Güterverkehrsleistungen der einzelnen Verkehrsmittel notwendigen Transportentfernungen pro Hauptverkehrsbeziehungen werden ebenfalls güterabteilungsscharf aus dem Klimaschutzenszenario der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ (Bergk et al., 2016) übernommen. Mit dem beschriebenen Vorgehen wird beispielsweise gewährleistet, dass die veränderten Güterströme in Folge der Energiewende, bspw. durch das Wegfallen der Braun- und Steinkohle-Transporte, berücksichtigt werden. Auch die Wechselwirkungen zu anderen Umweltzielen – wie bspw. die Flächenneuversiegelung bis 2050 auf null zu reduzieren – werden berücksichtigt, indem die deutlich veränderten Transportströme im Hoch- und Tiefbau im Modell abgebildet werden. Insgesamt wird damit eine szenarienkonsistente Darstellung der Güterverkehrsmengen gewährleistet.

Bis zum Jahr 2030 verzeichnen die Green-Szenarien bis auf GreenSupreme einen Anstieg der Güterverkehrsleistung um 4-8 % und liegen mit 640 bis 660 Mrd. tkm nahe beieinander. Aufgrund der stark unterschiedlichen Energie- und THG-Intensität pro tkm ist diese Gesamtzahl jedoch nur bedingt aussagekräftig. Vielmehr müssen Modal-Split und Verkehrsleistung gemeinsam betrachtet werden. Nur GreenSupreme liegt mit rund 610 Mrd. tkm deutlich unterhalb dieser Spanne und sogar etwas unter dem Niveau des Referenzjahres 2010 (613 Mrd. tkm). Damit liegen im Güterverkehr die Verkehrsleistungen sämtlicher Green-Szenarien deutlich unter den Werten der „Verflechtungsprognose 2030“ des BMVI (BMVI, 2014) mit rund 840 Mrd. tkm im Jahr 2030. Dies resultiert insbesondere aus den Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung und der veränderten Methodik. In allen Green-Szenarien steigt der Modal-Split-Anteil der im Vergleich zur Straße umweltfreundlicheren Verkehrsträger Schiene und Wasserstraße von 28 % (2010) auf 33 % (GreenLate) bis 38 % (GreenSupreme) im Jahr 2030. In der BMVI-Prognose sinkt dieser Anteil hingegen leicht auf 27,5 % (BMVI, 2014).

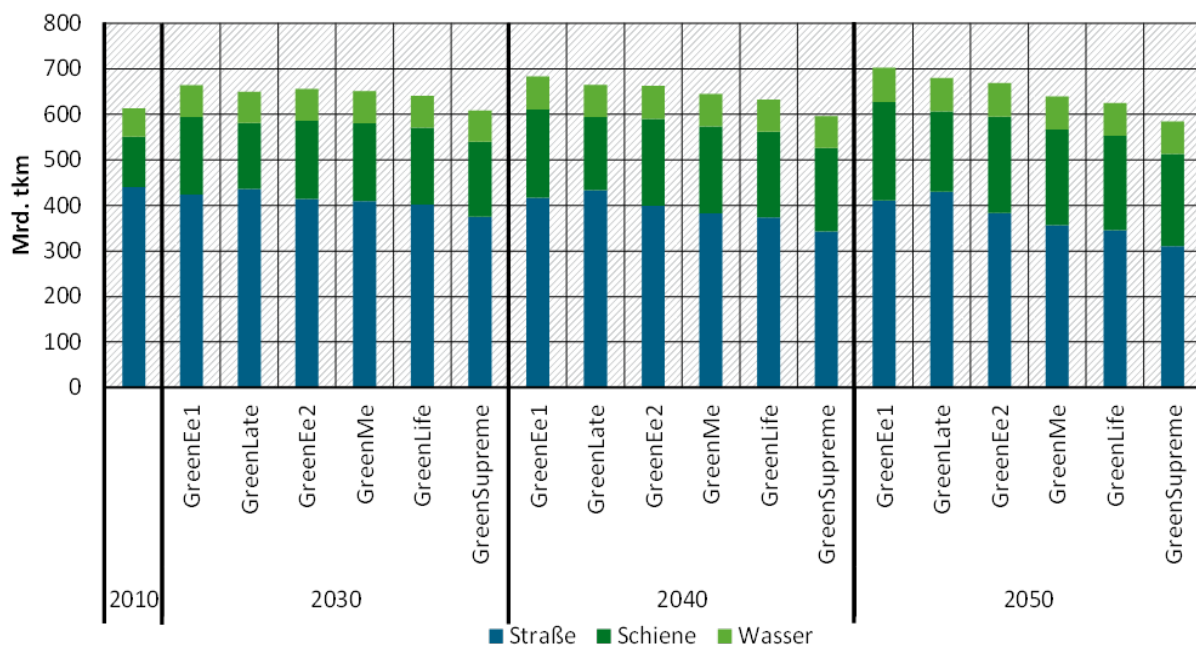
Bis zum Jahr 2050 vergrößert sich die Bandbreite der Güterverkehrsleistung zwischen den Szenarien und liegt zwischen -5 % und +15 % gegenüber 2010. Dabei weist GreenSupreme die geringste (rund 580 Mrd. tkm) und GreenEe1 die höchste (rund 700 Mrd. tkm) Verkehrsleistung auf. Die höhere Güterverkehrsleistung von GreenEe1 gegenüber GreenLate erklärt sich aufgrund der stärkeren Verlagerung. Trotz identischen Transportaufkommens steigen die Transportentfernungen, da die Straße über ein feinmaschigeres Verkehrsnetz als Schiene und Binnenschiff verfügt. GreenMe, GreenLife und GreenSupreme sind durch die innerhalb der

<sup>78</sup> Nomenclature Uniforme de Marchandises pour les Statistiques de Transport (Einheitliches Verzeichnis der Güterverkehrsstatistik). Erfasst werden 20 Abteilungen von Gütertransporten (Statistisches Bundesamt, 2008).



Szenarien geringsten Verkehrsleistungen im Güterverkehr charakterisiert (rund 640/625/580 Mrd. tkm). Hinsichtlich der Modal-Split-Verteilung erzielen Schiene und Wasserstraße in allen Szenarien außer GreenLate hohe Anteile von 42 % (GreenEe1) bis 47 % (GreenSupreme). Nur GreenLate fällt mit einem Modal-Split-Anteil von 37 % deutlich dahinter zurück. In GreenSupreme sind Bahn und Binnenschiff mit rund 47 % dem Lkw nahezu ebenbürtig – siehe hierzu auch Abbildung 5-54 sowie Abbildung 5-55.

**Abbildung 5-54: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsarten in den Green-Szenarien**

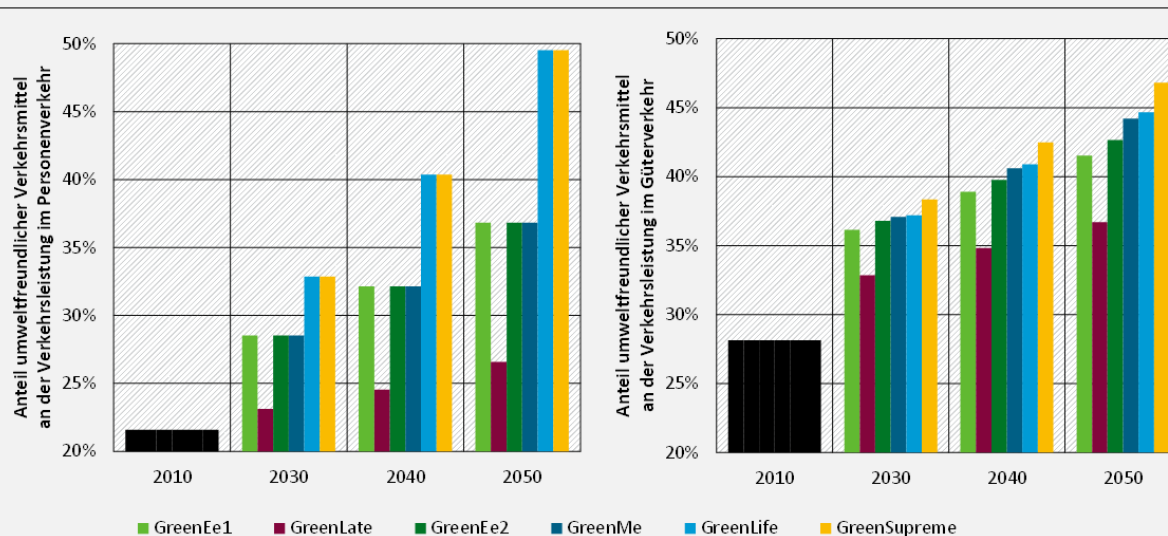


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### TextBox 5-8: Anteile umweltfreundlicher Verkehrsmittel an der Verkehrsleistung

Die Höhe des Anteils umweltfreundlicher Verkehrsmittel an der Verkehrsleistung ist ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz im nationalen Verkehr. Im zeitlichen Verlauf von 2010 bis 2050 ergeben sich zum Teil deutliche Zunahmen in den verschiedenen Szenarien, die in Abbildung 5-55 dargestellt sind. Der Verlauf ist qualitativ im Personen- und Güterverkehr relativ ähnlich, die Zunahmen im Personenverkehr jedoch in GreenLife und GreenSupreme größer. Im Personenverkehr sind die Unterschiede zwischen den Green-Szenarien stärker ausgeprägt.

Abbildung 5-55: Entwicklung des Anteils umweltfreundlicher Verkehrsmittel im Personen- und Güterverkehr in den Green-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.4.3.3 Internationaler See- und Luftverkehr

Die für die Ausgestaltung der Szenarien getroffenen Annahmen wirken sich – wie bereits beschrieben – direkt und indirekt auf die Menge und Verkehrsleistung der Warentransporte der deutschen Volkswirtschaft aus. Die Berechnungen hierzu werden mit dem Modell URMOD durchgeführt. Die Ergebnisse bestimmen somit auch den Umfang des internationalen Seeverkehrs, der Deutschland zuzurechnen ist.

#### TextBox 5-9: Internationaler Seeverkehr: Methodik zur Ableitung der Güterverkehrsleistung und des spezifischen Endenergieverbrauchs

Der Verkehrsaufwand für den internationalen Seeverkehr wird aus Destatis-Daten zu Güterumschlagsmengen im Versand und Empfang nach Güterabteilungen sowie Region bzw. Land für 2012 (Statistisches Bundesamt, 2012) abgeleitet. Dazu wird über beispielhafte Ziel-/Starthäfen eine mittlere Transportentfernung geschätzt (Sea distances, 2019). Die landesscharfen Daten zur Transportleistung wurden anschließend für die Güterabteilungen aggregiert, über die in URMOD bestimmten Import- und Exportmengen bis 2050 fortgeschrieben und davon pauschal 50 % Deutschland zugerechnet.

Zur Ableitung des Endenergieverbrauchs (siehe Ergebnisse in Kapitel 5.4.4.3) werden güterabteilungsfeine Daten zum spezifischen Endenergieverbrauch genutzt (EcoTransIT world, 2019). Diese wurden entweder direkt entnommen (im Falle von Massengut) oder über durchschnittliche Container-Zuladungen und Packdichten in Endenergieverbräuche pro Verkehrsaufwand umgerechnet<sup>79</sup> (ifeu Heidelberg et al., 2019). Die Güterabteilungen nach NST2007 (Statistisches Bundesamt, 2008) wurden jeweils einer Transportart zugeordnet und damit ein spezifischer Verbrauchsfaktor als Wert für 2010 zugeordnet.

Die internationalen Güterverkehre, die Deutschland zuzurechnen sind, werden zum weitaus größten Teil durch den internationalen Seeverkehr abgewickelt. Er lag 2010 bei 900 Mrd. tkm,

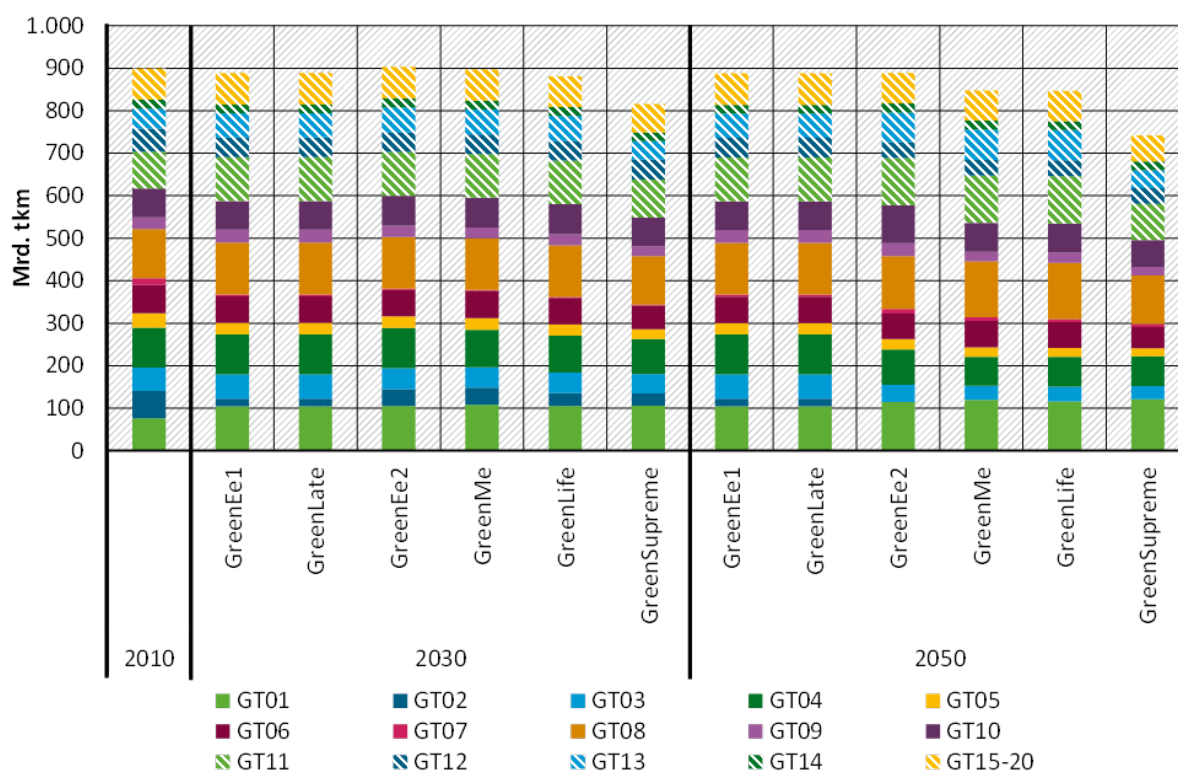
<sup>79</sup> Bulk und drei verschiedene Containertypen. Schiffstyp jeweils CC global average; Standardwerte für Geschwindigkeitsreduktion und Beladungsfaktor.

(vgl. Abbildung 5-56). Die für die Szenarien getroffenen Annahmen führen 2030 noch nicht zu größeren Veränderungen der internationalen Güterverkehrsleistung. Lediglich in GreenSupreme verringert sich die Verkehrsleistung um 9 % deutlich (auf dann rund 820 Mrd. tkm). Die Verkehrsleistung der anderen Green-Szenarien liegt weiterhin bei ca. 900 Mrd. tkm. Es kommt allerdings in allen Szenarien zu Verschiebungen zwischen den Güterabteilungen (GT). So werden insbesondere 35 bis 70 % weniger Energieträger (Kohle, Rohöl und Erdgas) transportiert (GT02), jedoch rund 40 % mehr landwirtschaftliche Produkte (GT01). Die Transportleistung für Kokerei- und Mineralölerzeugnisse (GT07) verringert sich aufgrund der Dekarbonisierung auf maximal 1/3 des Wertes von 2010. Zu dieser Güterabteilung wird auch das importierte erneuerbare PtL gezählt.

Trotz sehr unterschiedlich getroffener Annahmen ist auch 2050 die resultierende Bandbreite der Verkehrsleistung über alle Gütergruppen gering. Die GreenEe-Szenarien und GreenLate verharren weiterhin auf dem Niveau von 2010 bei ca. 890 Mrd. tkm. GreenMe und GreenLife weisen Minderungen um rund 6 % gegenüber 2010 auf. Lediglich in GreenSupreme geht die Verkehrsleistung deutlich, und zwar um 17 %, zurück. Die Verschiebungen zwischen den Gütergruppen verstärken sich bis 2050 noch. Fossile Energieträger (GT02) werden dann nicht mehr genutzt oder transportiert. Kokerei- und Mineralölerzeugnisse (GT07) sind wieder stärker vertreten als 2030. Das ist auf die erhöhte Einfuhr von erneuerbarem PtL für Verkehr und Industrie zurückzuführen.

Seit mehreren Jahrzehnten steigt die globale Verkehrsleistung des Luftverkehrs stark an und verdoppelte sich innerhalb der vergangenen 16 Jahre (UBA, 2019q), Kap.2.2). Davon sind Deutschland 2010 rund 194 Mrd. Pkm zuzurechnen, wovon rund 154 Mrd. Pkm privaten und rund 40 Mrd. Pkm geschäftlichen Reisen zugeordnet werden.

**Abbildung 5-56: Entwicklung der Verkehrsleistung des Deutschland anzurechnenden internationalen Seeverkehrs in den Green-Szenarien (nach Güterabteilungen gemäß NST2007 (Statistisches Bundesamt, 2008))**

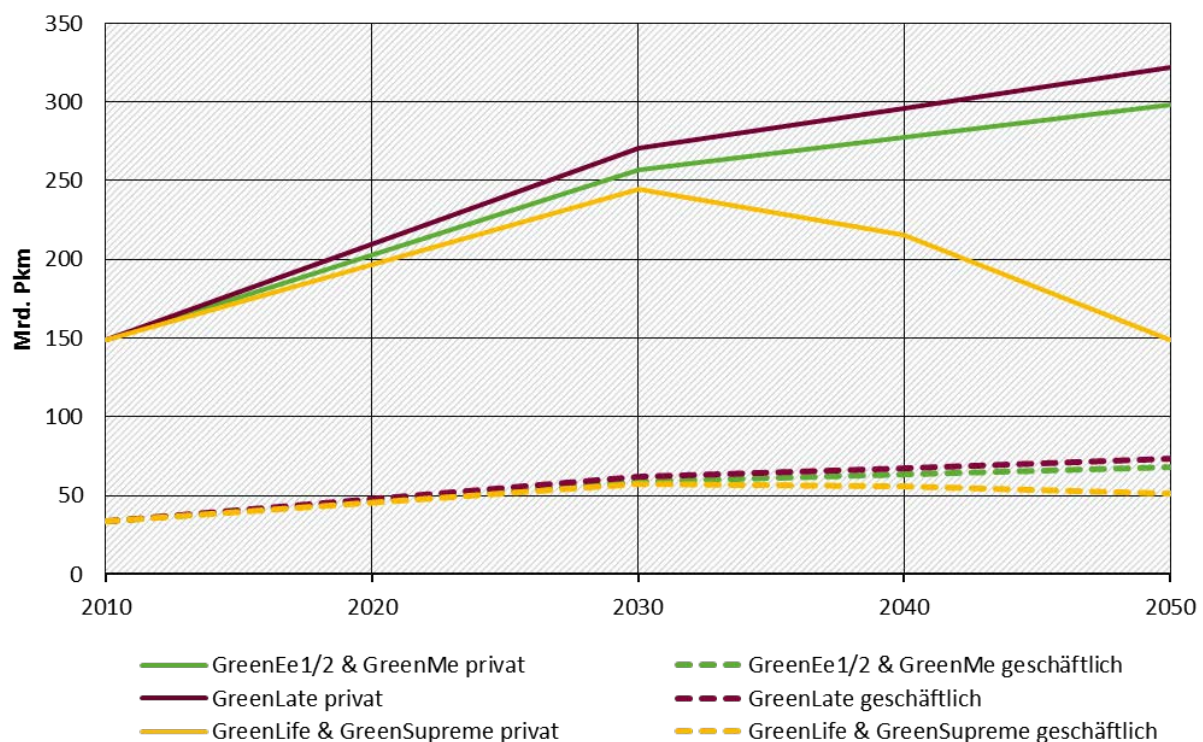


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)



Prognosen zeigen ein weltweites Anwachsen des Luftverkehrs um 4 % bis 5 % pro Jahr (Boeing, 2018; Cames, 2019). Entsprechend der Szenariencharakteristik spiegelt sich dies unterschiedlich in den Green-Szenarien wider. So wächst die Verkehrsleistung in GreenLate, dem am wenigsten ambitionierten Szenario, bis 2030 um knapp 3 % pro Jahr, was sich im weiteren Verlauf auf jährlich 0,9 % bis 0,8 % abschwächt. Die GreenEe-Szenarien und GreenMe sind anspruchsvoller. Die jährliche Zuwachsrate ist um ca. 0,2 %-Punkte pro Jahr geringer. Das führt 2050 zu rund 380 Mrd. Pkm, was gegenüber GreenLate ca. 30 Mrd. Pkm weniger sind, aber dennoch im Vergleich mit 2010 fast eine verdoppelte Verkehrsleistung darstellt. Nur mit den sehr ambitionierten Annahmen der Szenarien GreenLife und GreenSupreme gelingt es die Verkehrsleistung des internationalen Luftverkehrs ab 2030 zu vermindern und mit rund 200 Mrd. Pkm im Jahr 2050 fast auf das Niveau von 2010 zurückzuführen. Dazu wird unterstellt, dass 25 % der internationalen Flüge, geschäftliche wie private, vermieden, und weitere 25 % der privaten internationalen Flüge auf den bodengebundenen Verkehr verlagert werden. In Abbildung 5-57 sind die Verkehrsleistungen zusammenfassend dargestellt.

**Abbildung 5-57: Entwicklung der Verkehrsleistung im internationalen Luftverkehr (Personen) der Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.4.4 Endenergieverbrauch

Auf Basis der im vorherigen Kapitel beschriebenen Verkehrsleistungen ergeben sich über die spezifischen Energieverbräuche der verschiedenen Verkehrsmittel die jeweiligen Endenergieverbräuche im Personen- und Güterverkehr. In diesem Kapitel werden die maßgeblichen Treiber und Entwicklungen für den Endenergieverbrauch des nationalen Güter- und Personenverkehrs sowie des internationalen Verkehrs dargestellt.

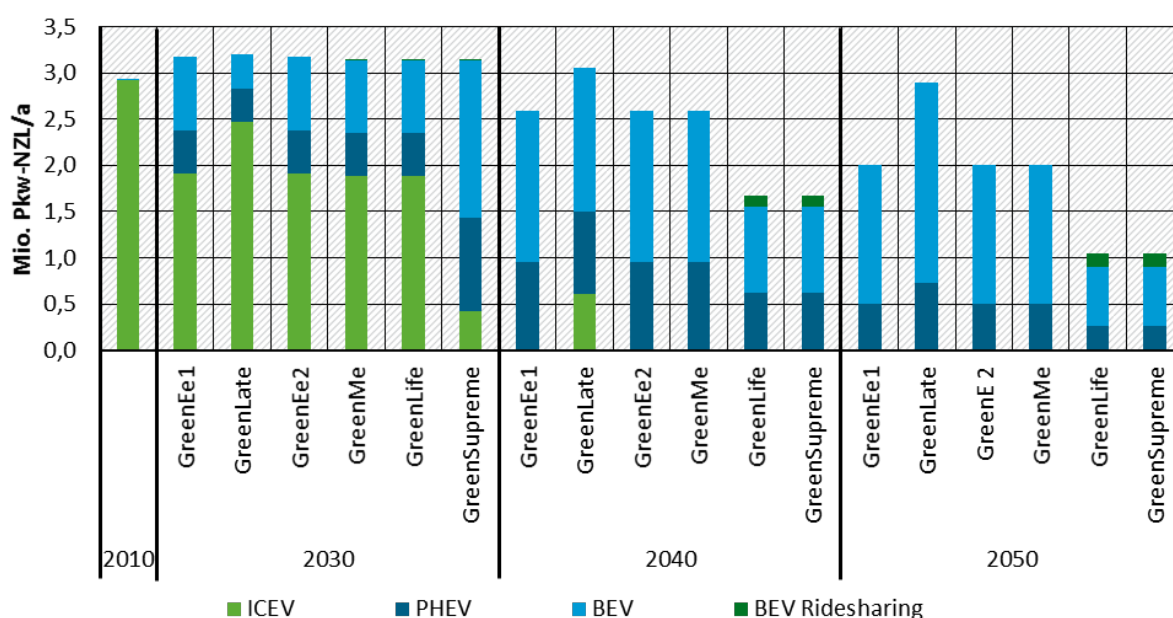


#### 5.4.4.1 Personenverkehr national

Der Endenergieverbrauch im Personenverkehr wird maßgeblich durch den Pkw-Verkehr bestimmt. Öffentliche Verkehrsmittel wie Busse und Schienenverkehr, deren relative Bedeutung bis 2050 aufgrund der Verkehrswende in allen Bereichen zunimmt, spielen nur eine nachgeordnete Rolle. Gleiches gilt für motorisierte Zweiräder und den nationalen Luftverkehr.

Im Pkw-Bereich spielt der Grad der Elektrifizierung eine entscheidende Rolle zum Erreichen der Klimaschutzanforderungen im Verkehr. Durch die Elektrifizierung nimmt der Endenergiebedarf pro gefahrenem Kilometer aufgrund der höheren Effizienz der Elektromotoren im Vergleich zu Verbrennungsmotoren stark ab. Langfristig können Elektrofahrzeuge zudem den erneuerbaren Strom auch ohne Umwandlung direkt nutzen.<sup>80</sup> Dadurch tragen sie letztendlich sowohl im Transformationsprozess als auch im Zieljahr 2050 wesentlich zum Klimaschutz im Verkehrsbereich bei. Abbildung 5-58 zeigt die Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen und damit den Hochlauf der Elektromobilität bei Pkw-Neuzulassungen in den verschiedenen Green-Szenarien.

**Abbildung 5-58. Entwicklung der Pkw-Neuzulassungen nach Antriebsart in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Von den 2030 erstmalig zugelassenen Pkw sind schon viele reine Elektrofahrzeuge (BEV) oder zumindest extern-aufladbare Hybridelektrofahrzeuge (PHEV): In GreenLate jedoch nur 23 % der ca. 3 Mio. neuen Pkw, in GreenSupreme bereits 87 % der neuen Pkw und in allen anderen Szenarien rund 40 %. Im Jahr 2040 sind dann abgesehen von GreenLate schon alle neuen Pkw elektrisch und der Anteil von PHEV an den neu zugelassenen Elektro-Pkw nimmt ab. In GreenLate sind aber zumindest 80 % der Neuzulassungen bereits elektrische Pkw, ab 2045 ebenfalls 100 %. Im Jahr 2050 werden somit nur noch Elektro-Pkw zugelassen, wobei in allen Szenarien nur noch rund ein Viertel der neuen E Pkw Plug-in-Hybride sind. Einige der

<sup>80</sup> Die Nutzung von strombasierten Kraftstoffen hätte Umwandlungsverluste bei der PtG/PtL-Herstellung und weitere Verluste bei der Nutzung in Verbrennungsmotoren bzw. Brennstoffzellen zur Folge. Der Bedarf an erneuerbarem Strom pro gefahrenem Kilometer ist daher um ein Vielfaches höher als bei batterie-elektrischen Fahrzeugen.

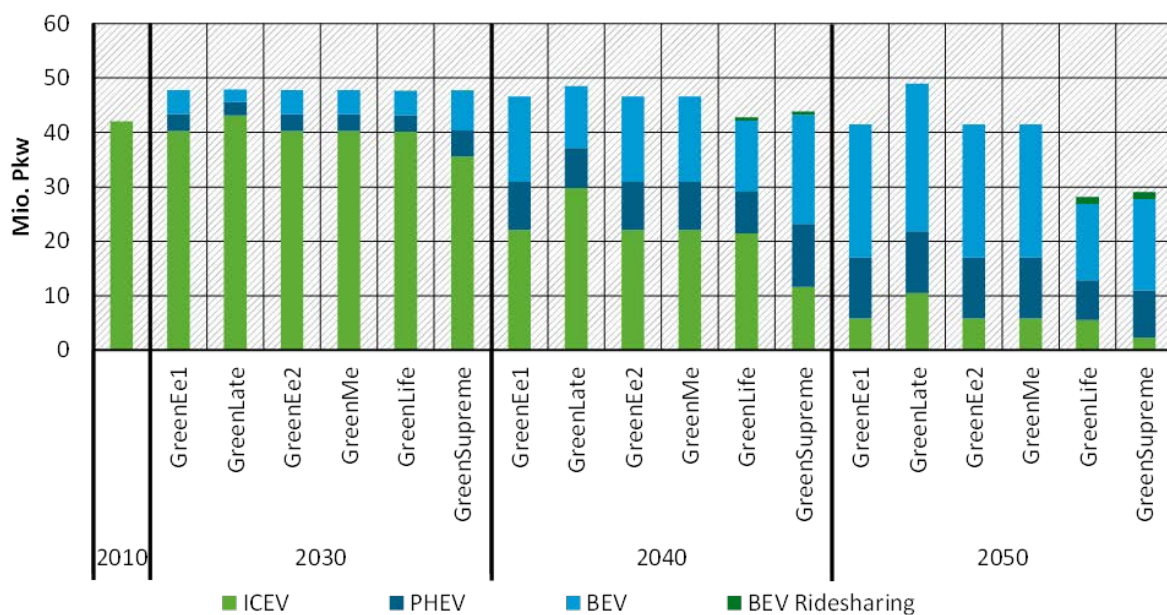
Elektrofahrzeuge werden auch gezielt für eine geteilte Nutzung (Ridesharing) angeschafft und betrieben.

Für den Energieverbrauch von PHEV wird angenommen, dass diese im Mittel 75 % der Fahrleistung elektrisch erbringen<sup>81</sup>. Bezüglich der Eigenschaften der Elektrofahrzeuge gibt es zwischen den Szenarien nur wenige Unterschiede. Die elektrischen Reichweiten steigen im Zeitraum 2030 bis 2050 sowohl für BEV als auch für PHEV noch einmal deutlich an, da weiterer technischer Fortschritt, insbesondere bei der Speicherdichte, unterstellt wird. Ein maßgeblicher Unterschied ist jedoch, dass in GreenMe und GreenSupreme die BEV und PHEV tendenziell kleinere Akkus mit geringen Kapazitäten und damit eine geringere elektrische Reichweite besitzen (Kapitel 5.4.7.2).<sup>82</sup>

Aufgrund des teilweise deutlichen Rückgangs der Verkehrsleistung nimmt auch die Anzahl an Neuzulassungen von Pkw in den Green-Szenarien gegenüber dem Niveau 2030 bis 2040 und 2050 ab. Nur in GreenLate sind es in den Jahren 2040 und 2050 noch ca. 3 Mio. neu zugelassene Pkw pro Jahr. In den Szenarien mit Ridesharing und einer starken Verkehrswende, also GreenLife und GreenSupreme, werden jährlich nur noch rund 1 Mio. Pkw neu zugelassen. In GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe liegt die Anzahl der Pkw-Neuzulassungen im Jahr 2050 bei ca. 2 Mio..

Der zunehmende Anteil elektrischer Fahrzeuge an den Neuzulassungen führt auch zu einer starken Elektrifizierung des Pkw Bestandes – jedoch zeitlich verzögert. In der folgenden Abbildung 5-59 ist die Entwicklung des Pkw-Bestandes bis 2050 nach Antriebsart dargestellt.

**Abbildung 5-59. Entwicklung des Pkw-Bestands nach Antriebsart in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

<sup>81</sup> Dies setzt entsprechend große Akkus in den Fahrzeugen und ein ausreichend häufiges Laden der PHEV voraus, erscheint jedoch für den Zeitraum bis 2050 eine realistische Annahme zu sein.

<sup>82</sup> Je nach Fahrzeuggröße und -konzept um 10 bis 30 % geringere Kapazitäten. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass aufgrund eines stärkeren Ausbaus der Schnelladeinfrastruktur keine Verhaltensänderungen der Nutzer notwendig sind, um das gleiche Nutzungsprofil der BEV und PHEV wie in den anderen Szenarien zu ermöglichen. Die kleineren Batteriekapazitäten haben Vorteile auf den Rohstoffverbrauch und damit die Umweltwirkungen der Fahrzeugherstellung, aber auch in der Fahrzeugnutzung (Helms et al., 2016).

Trotz der zum Teil schon sehr hohen Neuzulassungsanteile von elektrischen Pkw in 2030 und 2040 nimmt die Durchdringung des Bestandes mit Elektro-Pkw eine gewisse Zeit in Anspruch. So sind in allen Szenarien selbst im Jahr 2050 noch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren im Bestand, sie machen allerdings nur 10 bis rund 20 % aus. Deren Anteile an der Fahrleistung sind noch geringer, da diese vergleichsweise alten Pkw tendenziell eine geringere Jahresfahrleistung haben als neuere Pkw. Die leicht geringeren Neuzulassungszahlen in GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe sowie die deutlich geringeren Neuzulassungszahlen in GreenLife und GreenSupreme führen auch zu einer absoluten Abnahme des Pkw-Bestands bis zum Jahr 2050. In GreenLife und GreenSupreme gibt es dann nur noch unter 30 Mio. Pkw im Bestand.<sup>83</sup> Zum Jahresanfang 2019 waren dies noch ca. 47 Mio. Pkw.

Im Jahr 2030 sind in den meisten Green-Szenarien rund 7,5 Mio. elektrische Pkw im Bestand. In GreenLate sind es nur rund 4,5 Mio. E-Pkw, in GreenSupreme sind es mit rund 12 Mio. elektrischen Pkw noch einmal deutlich mehr (ca. ein Viertel des Bestandes). Im Jahr 2040 sind mit Ausnahme von GreenLate mindestens die Hälfte des Bestandes E-Pkw. In GreenLate liegt der Anteil bei ca. 40 % und damit leicht darunter.

Ridesharing-Pkw erreichen bis zum Jahr 2050 einen Anteil von ca. 5 % am Pkw-Bestand, erbringen jedoch aufgrund der intensiven Nutzung einen deutlich größeren Anteil an der Pkw Verkehrsleistung von ca. einem Drittel (siehe Abbildung 5-52).

Die deutliche Abnahme des Endenergieverbrauches resultiert neben der Verringerung der Fahrleistungen und der Elektrifizierung der Fahrzeuge auch aus der Verbesserung der technischen Effizienz der Pkw. Größere Potentiale zur Effizienzverbesserung sind zwischen 2010 und 2050 bei Pkw mit Verbrennungsmotoren zu erwarten; aber auch bei E-Pkw kommt es bis 2050 zu Verbesserungen. Um diese Verbesserungen der Energieeffizienz zu erreichen, müssen Anreize gesetzt werden. Mit den Flottenzielwerten für Pkw, Lkw und leichte Nutzfahrzeuge für den Zeitraum bis 2030 sind bereits erste Anreize gesetzt. Bei großen Anteilen von neuen E-Pkw an den Neuzulassungen bis 2030 sind allerdings die Flottenzielwerte nicht ausreichend, um weitere Verbesserung von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu erreichen. Daher sind weitergehende Maßnahmen notwendig, wie beispielsweise die Einführung eines Bonus-Malus-Systems auf Basis der CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuen Pkw. Die Verbesserung der Effizienz ist exemplarisch für einen Benzin Pkw mit mittlerer Größe auf Autobahnen in Tabelle 5-22 gezeigt.

---

<sup>83</sup> Die Unterschiede im Pkw-Bestand zwischen GreenLife und GreenSupreme im Jahr 2040 und 2050 sind Ursache des größeren Anteils an E-Fahrzeugen und deren leicht längeren Nutzungsdauer. Zur Vermeidung dieses Effektes hätte die Neuzulassungszahl in GreenSupreme leicht nach unten korrigiert werden müssen, da die Fahrleistungen in beiden Szenarien gleich sind. Diese wurde jedoch nicht modelliert, da es nicht ergebnisrelevant ist.

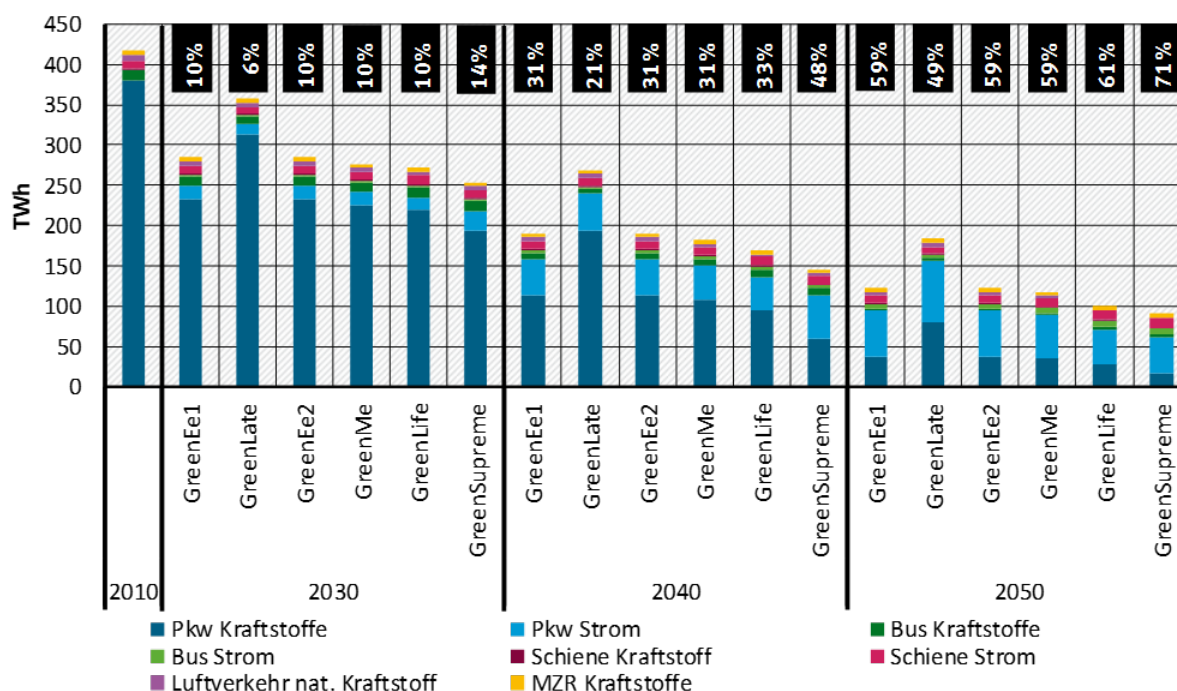
**Tabelle 5-22: Effizienzentwicklung neuer Benzin-Pkw auf Autobahnen in den Green-Szenarien**

Jahr	GreenEe1/2 & GreenLife	GreenLate	GreenMe & GreenSupreme
2020	89 %	92 %	87 %
2030	79 %	87 %	75 %
2040	72 %	82 %	69 %
2045	-	80 %	-

Hinweis: Größenklasse mittel. spezifischer Verbrauch im Jahr 2010 = 100 %. Abgesehen von GreenLate ab 2040 keine Neuzulassung von Benzin-Pkw mehr. In GreenLate noch bis 2045.

Quelle: Eigene Zusammenstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Abweichend zu den anderen Szenarien nimmt der Kraftstoffverbrauch der Pkw in GreenLate langsamer ab. Der verstärkte Leichtbau in GreenMe und GreenSupreme<sup>84</sup> (siehe Kapitel 5.4.7.1) ermöglicht im Gegensatz dazu eine noch stärkere Abnahme des Kraftstoffverbrauches. Mit den deutlichen Effizienzverbesserungen bei Pkw mit Verbrennungsmotor zwischen 2020 und 2030 und dem großen Anteil elektrischer Fahrzeuge an den Neuzulassungen, werden in allen Szenarien die Effizienzvorgaben der Flottenzielwerte neuer Pkw für die Zeit bis 2030 mit Minderungsanforderungen von 37,5 % (EP & Rat der Europäischen Union, 2019) erreicht bzw. zum Teil deutlich überschritten.

**Abbildung 5-60: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im nationalen Personenverkehr nach Energieträger in den Green-Szenarien**

Hinweis: Zusätzlich ist der Anteil an Strom am Endenergieverbrauch ausgewiesen.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

<sup>84</sup> Schnellere Zunahme des Leichtbauanteils und 30 % statt 20 % Leichtbauanteil in 2050. Dabei kommen auch carbonfaserverstärkte Kunststoffe zusätzlich zu Aluminiumwerkstoffen zum Einsatz.



Abbildung 5-60 zeigt für alle Verkehrsmittel im nationalen Personenverkehr den Endenergieverbrauch nach Energieträger. Zusätzlich ist der Anteil des Stroms am Endenergieverbrauch ausgewiesen. Der Endenergieverbrauch nimmt im Zeitraum von 2010 bis 2030 mit 32 bis 39 % (GreenSupreme) in Folge der Verkehrswende und der beginnenden Energiewende im Verkehr stark ab. Nur in GreenLate werden diese Maßnahmen weniger intensiv verfolgt und der Endenergiebedarf sinkt nur um 14 % bis 2030 gegenüber 2010.

Der Stromanteil am Endenergiebedarf steigt bis zum Jahr 2030 leicht und danach stärker an und erreicht im Jahr 2050 Anteile von 49 % (GreenLate) bis 71 % (GreenSupreme). Der Verbrauch an Kraftstoffen in nationalen Verkehren sinkt im Szenario GreenSupreme von mehr als 400 TWh im Jahr 2010 sehr stark auf 26 TWh im Jahr 2050 ab. In GreenLate ist er mit rund 94 TWh im Jahr 2050 mehr als dreimal so hoch wie in GreenSupreme. In allen Szenarien außer GreenSupreme werden im Zeitraum 2040 bis 2050 im nationalen Verkehr die Kraftstoffe fossilen bzw. biogenen Ursprunges vollständig durch strombasierte Kraftstoffe ersetzt. In GreenSupreme werden schon 2030 und 2040 strombasierte Kraftstoffe eingesetzt, die dann bereits fossile Kraftstoffe ersetzen, um eine schnellere THG-Minderung erzielen zu können (siehe auch Kapitel 5.2.4).<sup>85</sup>

Die Zunahme der Verkehrsleistung der öffentlichen Verkehre (Bus, Schienenverkehr) führt dazu, dass trotz Effizienzverbesserungen und Elektrifizierung der absolute Endenergieverbrauch bei diesen Verkehrsarten weniger stark abnimmt als im Pkw-Verkehr. Gleichwohl wird der Endenergiebedarf auch im Jahr 2050 weiterhin von Pkw dominiert, sodass die öffentlichen Verkehre für die Gesamtbetrachtung des Personenverkehrs weniger bedeutend sind. Im Bereich motorisierter Zweiräder wurde keine Elektrifizierung berücksichtigt, auch wenn diese durchaus wahrscheinlich ist. Auch hier könnte bis 2050 der Endenergiebedarf sinken und ein Teil des Verbrauches in Form von Strom erfolgen. Für das Gesamtergebnis ist dies vor dem Hintergrund der geringen Verkehrsleistung und Endenergiemengen nicht ausschlaggebend. Ebenso wurde im nationalen Luftverkehr keine Elektrifizierung betrachtet. Dessen Anteil am Endenergieverbrauch ist jedoch auch relativ gering. In den Szenarien GreenLife und GreenSupreme sinkt er bis 2050 durch Maßnahmen zur Flugvermeidung und -verlagerung zudem auf null. Im Szenario GreenSupreme nutzt der Schienenverkehr ausschließlich direkten Strom und keine Kraftstoffe.

#### 5.4.4.2 Güterverkehr national

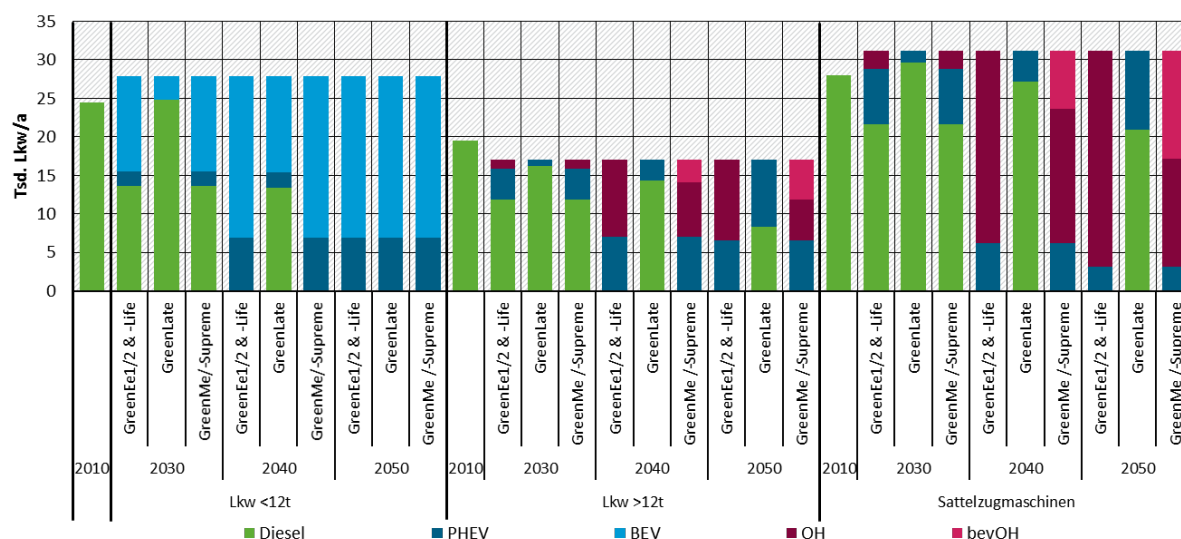
Auch im Güterverkehr wird der Endenergieverbrauch maßgeblich vom Verbrauch im Straßenverkehr dominiert. Der größere Anteil stammt von schweren Nutzfahrzeugen und ein weitaus geringerer Anteil von leichten Nutzfahrzeugen (LNF). Jedoch tragen auch Schienenverkehr und Binnenschiffe zum Endenergieverbrauch im Güterverkehr bei. Je nach Intensität von Maßnahmen zur Verkehrswende und der Elektrifizierung im Straßengüterverkehr, nimmt deren Anteil am Endenergieverbrauch von 4 % im Jahr 2010 auf bis zu 12 % im Jahr 2050 zu (GreenSupreme).

Dennoch bleibt der Straßengüterverkehr in allen Szenarien besonders wichtig, sodass Maßnahmen zur Verringerung des Endenergiebedarfes insbesondere auch dort ergriffen werden müssen. Die Nutzung elektrischer Antriebe bei LNF sowie Lkw ist aufgrund der hohen Energieeffizienz und tendenziell auch geringen Kosten (Schmied et al., 2015; UBA, 2016c) eine vielversprechende Option. Bei LNF kann diese ähnlich wie bei Pkw durch den Einsatz rein batterieelektrischer Fahrzeuge oder durch Plug-in-Hybride erfolgen. Auch Lkw mit einem

<sup>85</sup> Dies sind ca. 21 TWh PtL im Jahr 2030 sowie ca. 42 TWh im Jahr 2040 für Personen- und Güterverkehr bei einem fossilen Kraftstoffverbrauch von ca. 321 TWh (2030) bzw. 127 TWh (2040) der nationalen Verkehre. Eine Aufteilung auf Personen- und Güterverkehr erfolgt anteilig entsprechend der Kraftstoffverbräuche in beiden Bereichen.

zulässigen Gesamtgewicht (zGG) von bis zu 12 t, die im Verteiler- und Regionalverkehr eingesetzt werden, können als BEV oder PHEV realisiert werden. Lkw mit zGG größer 12 t und Sattelzugmaschinen, die vor allem im Fernverkehr zum Einsatz kommen, eignen sich aufgrund des Energiebedarfes und des Einsatzprofils weniger für eine Elektrifizierung mit Batterien, wenn überhaupt dann als Plug-in-Hybride. Ansonsten würde durch die großen und damit schweren Akkus zu viel Ladevolumen- und -gewicht verloren gehen. In diesem Bereich kann jedoch die Elektrifizierung durch Oberleitungen<sup>86</sup> in Kombination mit Oberleitungshybrid-Lkw, die einen Stromabnehmer besitzen, zum Einsatz kommen. In allen Szenarien außer GreenLate wird unterstellt, dass die hierfür erforderlichen Infrastrukturen rechtzeitig errichtet werden und die Elektrifizierung im Schwerlastverkehr erfolgen kann. Konkret bedeutet dies, dass schnellstmöglich entlang der stark befahrenen Autobahnabschnitte die notwendige Oberleitungsinfrastruktur aufgebaut und so ein ausreichend dichtes Netz als Voraussetzung für eine Markteinführung der Lkw vorhanden ist. In GreenMe und GreenSupreme sind ab 2040 einige der Lkw dann auch rein elektrische Oberleitungs-Lkw (bevOH), die anstatt des Verbrennungsmotors zum Betrieb auf Strecken ohne Oberleitung einen größeren Akku nutzen, siehe Abbildung 5-61.

**Abbildung 5-61: Entwicklung der Lkw-Neuzulassungen nach Antriebsart in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Lkw bis zu einem zGG von 12 t eignen sich aufgrund des Nutzungsprofils und der regelmäßigen Fahrstrecken gut für eine Elektrifizierung, sodass 2030 in allen Szenarien außer GreenLate schon etwa 50 % der neuen Fahrzeuge Elektro-Lkw sind. Viele davon sind rein elektrische Lkw. 2040 sind dann alle neuen Lkw dieses Gewichtsbereiches elektrische Lkw. In GreenLate erfolgt der Markthochlauf verzögert, sodass der Anteil im Jahr 2040 bei ca. 50 % liegt und erst 2050 alle neuen Lkw elektrisch angetrieben werden (teilweise als PHEV).

Bei Lkw mit einem zGG über 12 t und Sattelzugmaschinen werden noch für längere Zeit Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren neu zugelassen. Im Jahr 2030 gibt es einen Anteil von Plug-in-Hybrid Lkw zwischen 5 % (GreenLate) und 23 % (andere Szenarien). In allen Szenarien außer GreenLate werden dann auch die ersten OH-Lkw neu zugelassen (rund 1.200 Stück pro Jahr; Anteil an Neuzulassungen: 7 %). Ab 2040 werden dann in diesen Szenarien alle neuen Lkw elektrisch angetrieben, der größere Teil dann auch als OH-Lkw. In GreenMe und GreenSupreme werden bis 2050 auch 50 % der OH-Lkw als bevOH-Lkw realisiert. In GreenLate können

<sup>86</sup> Als technische Alternative wären auch Stromschienen denkbar.

elektrische Antriebe nur langsam Marktanteile erobern (2050 nur 50 % Anteil an den Neuzulassungen). Oberleitungen werden in GreenLate nicht aufgebaut, sodass OH Lkw keine Verbreitung finden.

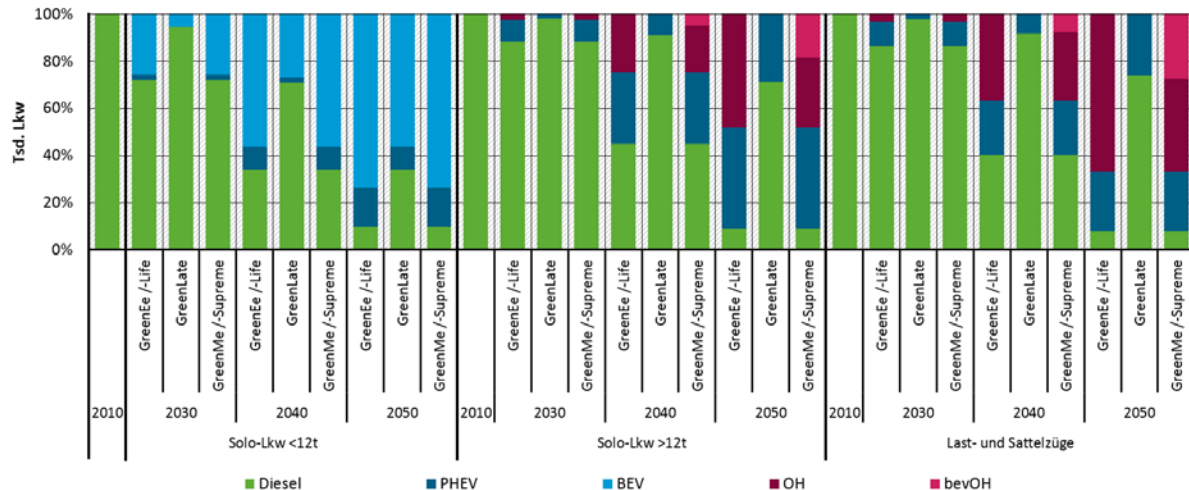
Bei Sattelzugmaschinen, die aufgrund der großen Fahrleistungen den größten Anteil am Endenergieverbrauch haben (Öko-Institut et al., 2018), ist die Entwicklung der Neuzulassungen nach Antriebsart sehr ähnlich zu Lkw über 12 t zGG. Abweichend von diesen ist in allen Szenarien außer GreenLate nur der Anteil der OH-Varianten an den Neuzulassungen 2040 und 2050 größer. Gründe hierfür sind, dass insbesondere deren Betrieb beispielsweise aufgrund großer Autobahnanteile, hoher Jahresfahrleistungen und auch bauartbedingt besonders gut für die Nutzung der Oberleitung geeignet ist. In GreenLate erreichen PHEV nach einem langsameren Hochlauf selbst 2050 nur einen Anteil von ca. 33 %. Auch bei Sattelzugmaschinen werden bis 2050 in GreenMe und GreenSupreme 50 % der OH-Lkw als bevOH-Lkw umgesetzt.

Für die PHEV in den verschiedenen Klassen ist die Ableitung eines elektrischen Fahranteils notwendig. Je größer das zGG der Klasse, desto geringer ist dieser. Im Mittel beträgt der elektrische Fahrleistungsanteil auch bei Lkw 75 % (Bergk et al., 2016). OH-Last- und Sattelzüge fahren zu 66 % elektrisch, der OH-Solo-Lkw zu 33 %.

In allen Szenarien außer GreenLate erfolgt der Markthochlauf bei den Neuzulassungen ähnlich wie im Bereich der Pkw in den GreenEe-Szenarien<sup>87</sup>. In GreenLate ist der Hochlauf bei den Neuzulassungen der LNF wie der von Pkw in gleichen Szenario.

Auf Basis dieser Neuzulassungen und der Erneuerung der Lkw-Flotten ergibt sich damit die Entwicklung des Bestandes nach Antriebsart, wie sie in Abbildung 5-62 dargestellt ist.

**Abbildung 5-62: Entwicklung der Anteile am Lkw-Bestand nach Antriebsart in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Aufgrund der großen Anteile elektrischer Lkw an den Neuzulassungen bei einem zGG unter 12 t, steigt der Anteil dieser Lkw auch im Bestand relativ schnell an. Er erreicht in allen Szenarien außer GreenLate 2030 schon ca. 30 %, 2040 ca. 65 % und im Jahr 2050 ca. 90 %. In GreenLate erfolgt der Hochlauf der E-Mobilität ca. eine Dekade verschoben.

Im Bereich der Solo-Lkw mit einem zGG über 12 t steigt der Anteil der elektrischen Varianten (PHEV, OH sowie bevOH) relativ schnell und erreicht 2040 in allen Szenarien außer GreenLate schon mehr als 50 %, sowie rund 90 % im Jahr 2050. Ab 2040 ist rund die Hälfte der

<sup>87</sup> In GreenSupreme wird daher im Unterschied zum Pkw kein schneller Hochlauf bei LNF unterstellt.

elektrischen Lkw eine Variante des OH-Lkw. Für Last- und Sattelzüge zeigt sich eine ähnliche Entwicklung der Bestandsanteile; jedoch mit einem größeren Anteil von OH- bzw. bevOH Lkw und allgemein leicht höherem Anteil von elektrischen Lkw. Grund ist die noch schnellere Flottenerneuerung aufgrund der großen Jahresfahrleistungen. In GreenLate gibt es keine OH-Lkw und auch im Bereich der Solo-Lkw mit zGG über 12 t sowie bei Sattelzügen nur relativ wenige Plug-in-Hybrid Lkw (2040 um 10 %, 2050 zwischen 25 und 30 %)<sup>88</sup>. Diesel-Lkw sind hier selbst im Jahr 2050 noch die dominierende Antriebstechnik. In GreenMe und GreenSupreme gibt es im Bestand 2040 und 2050 aufgrund der zusätzlichen Variante des bevOH-Lkw vier verschiedene Technik-Varianten, die auf deutschen Straßen unterwegs sind.

Die Effizienz der Lkw nimmt im Verlauf des Szenarios zu. Bei Lkw mit Verbrennungsmotor sind die relativen Minderungspotentiale dabei größer als bei elektrischen Lkw, da es dort noch mehr Möglichkeiten zur Verbesserung gibt sowie einige Maßnahmen im Bereich Motor und Getriebe ansetzen. In Tabelle 5-23 ist beispielhaft die Entwicklung der Effizienz neuer Sattelzüge für den Betrieb auf Autobahnen dargestellt.

**Tabelle 5-23: Effizienzentwicklung neuer Sattelzüge (Dieselmotor) auf Autobahnen**

Jahr	GreenEe1/2 , GreenLife, GreenMe & GreenSupreme	GreenLate
2020	92 %	96 %
2030	81 %	91 %
2040	75 %	85 %
2050	-	80 %

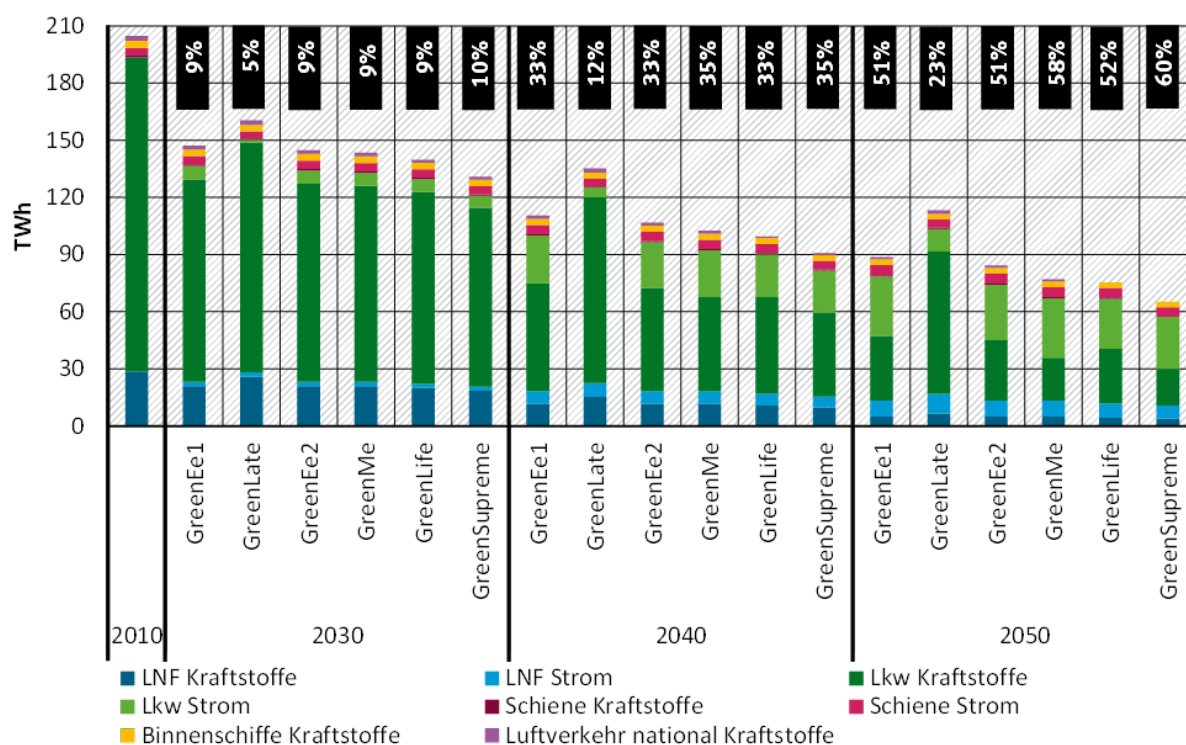
Hinweis: Spezifischer Verbrauch im Jahr 2010 = 100 %. Abgesehen von GreenLate ab 2040 keine Neuzulassung von Diesel-Sattelzügen mehr.

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die Effizienz der Sattelzüge verbessert sich in allen Szenarien außer in GreenLate im Zeitraum zwischen 2010 und 2040 um 25 %. Ab 2040 werden auch keine Diesel-Sattelzüge mehr neu zugelassen. In GreenLate verbessert sich die Effizienz bis 2050, also in einem 10 Jahre längeren Zeitraum, nur um 20 %. In der Dekade zwischen 2020 und 2030 werden EU weit erstmalig auch Effizienzanforderungen für die wichtigsten Lkw-Klassen gelten. Minderungen von im Mittel ca. 30 % werden dann gesetzlich vorgeschrieben sein. Durch die Elektrifizierung von Teilen der neuen Lkw und die Effizienzverbesserungen werden diese Anforderungen in allen Szenarien außer GreenLate ungefähr erreicht werden. Nur in GreenLate werden die im Mittel für die gesamte EU geltenden Vorgaben zur CO<sub>2</sub>-Minderung pro km nicht erfüllt.

<sup>88</sup> In Bereichen in denen Plug-in-Hybrid-Lkw eine technische absehbare und sinnvolle Option sind. Für einen breiten Einsatz in diesem Lkw-Bereich erscheint der Einsatz von BEV zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung nicht zielführend zu sein.



**Abbildung 5-63: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im nationalen Güterverkehr nach Energieträger in den Green-Szenarien**

Hinweis: Zusätzlich ist der Anteil an Strom am Endenergieverbrauch ausgewiesen. Im Jahr 2010 betrug dieser ca. 2 %.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Abbildung 5-63 zeigt den Endenergieverbrauch für die verschiedenen Verkehrsmittel im nationalen Güterverkehr nach Energieträger. Zusätzlich ist der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch ausgewiesen. Der Endenergieverbrauch nimmt im Zeitraum von 2010 bis 2030 mit 28 bis 36 % (GreenSupreme) in Folge der Verkehrswende und der beginnenden Energiewende im Verkehr stark ab. Nur in GreenLate werden diese Maßnahmen weniger intensiv verfolgt und der Endenergiebedarf nimmt im gleichen Zeitraum lediglich um 22 % ab. Der Stromanteil am Endenergiebedarf steigt bis zum Jahr 2030 leicht und danach stärker an und erreicht im Jahr 2050 Anteile von 23 % (GreenLate) bis 60 % (GreenSupreme). Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch ist im Güterverkehr in den Szenarien mit OH-Lkw um ca. 10 % geringer als im Personenverkehr. In GreenLate, d. h. ohne OH-Technik ist der Anteil mit 23 % nicht einmal halb so hoch wie im Personenverkehr. Der Verbrauch an Kraftstoffen im nationalen Güterverkehr sinkt von etwa 200 TWh im Jahr 2010 sehr stark auf bis zu 26 TWh im Jahr 2050 (GreenSupreme). In GreenLate ist er mit 87 TWh im Jahr 2050 mehr als dreimal so hoch wie in GreenSupreme.

Die Zunahmen der Verkehrsleistungen von Binnenschiff und Schiene im Güterverkehr führen dazu, dass trotz Effizienzverbesserungen und Elektrifizierung – zumindest für die Schiene – der Endenergieverbrauch bei diesen Verkehrsmitteln weniger stark abnimmt als im Lkw und LNF-Verkehr. Ihr Anteil steigt aus diesem Grund von 4 % (2010) auf 7 % (GreenLate) bzw. 10 bis 12 % (GreenEe1 bis GreenSupreme). Im Szenario GreenSupreme nutzt der Schienenverkehr ausschließlich Strom und keine Kraftstoffe. Trotz der zunehmenden Bedeutung von Schiene und Binnenschiff sind bezüglich des gesamten Endenergieverbrauches im nationalen Güterverkehr Lkw und LNF dominierend. Maßnahmen zur Verringerung der Verkehrsleistung sowie des Endenergieverbrauches im Rahmen der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr müssen also auch insbesondere bei diesen beiden Bereichen ansetzen. Im Bereich der

Binnenschifffahrt und dem nationalen Güterluftverkehr wurde die ausschließliche Verwendung von Kraftstoffen angenommen. Diese tragen auch eher gering zum Endenergieverbrauch des Güterverkehrs bei.

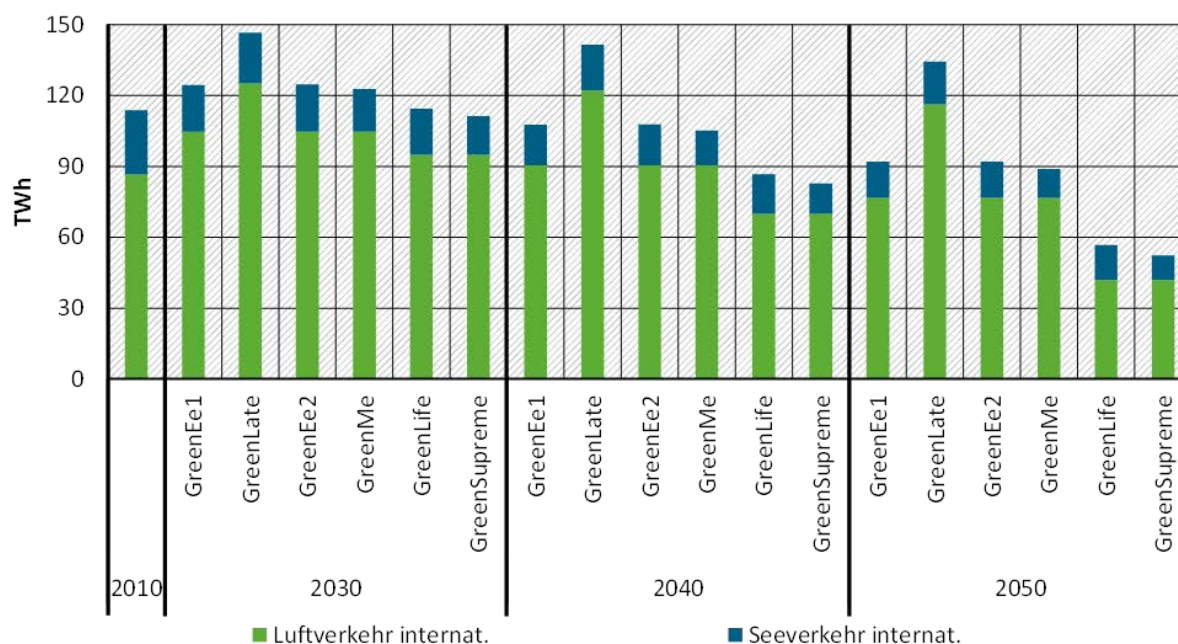
#### 5.4.4.3 Internationaler See- und Luftverkehr

Aus der Abbildung 5-65 zum Endenergieverbrauch im Verkehr nach Verkehrsmittel im Kapitel 5.4.4 sind die steigenden Anteile des internationalen Luft- und Seeverkehrs am insgesamt Deutschland zuzurechnenden Endenergieverbrauch ersichtlich. Diese Entwicklung wird bestimmt durch den internationalen Luftverkehr, der ohnehin ein Mehrfaches des Endenergieverbrauchs des internationalen Seeverkehrs hat, siehe Abbildung 5-64.

In absoluten Zahlen ist die Entwicklung bis 2030 gegenläufig. Im Luftverkehr wächst der Endenergieverbrauch zunächst deutlich an und erreicht erst 2040 (GreenEe, GreenMe) bzw. 2050 (GreenLife und GreenSupreme) Werte unter dem 2010er Ausgangswert. GreenLate liegt auch dann noch mit rund 116 TWh um 33 % über dem Wert von 2010. Der Anstieg der Luftverkehrsleistung ist durch Effizienzverbesserungen bis 2030 nicht kompensierbar. Erst danach, mit zunehmender Sättigung der Verkehrsleistung und insbesondere durch die unterstellten Verhaltensänderungen in GreenLife und GreenSupreme, sinkt der absolute Endenergieverbrauch. Nur wenn erhebliche Ambitionen und weitreichende Maßnahmen unterstellt werden, wird der Endenergieverbrauch des internationalen Luftverkehrs 2050 nicht höher liegen als 2010.

Im Seeverkehr ist schon 2030 in allen Szenarien ein geringerer Verbrauch erkennbar, der sich bis 2050 fortsetzt. Die Minderungen zwischen 2010 und 2050 liegen in der Bandbreite von 34 % (GreenLate) bis 62 % (GreenSupreme). Da sich in den Szenarien die Verkehrsleistungen nicht stark ändern, ist hier die Effizienzverbesserung der Schiffe der trendbestimmende Faktor.

**Abbildung 5-64: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im internationalen Flug- und Seeverkehr in den Green-Szenarien**



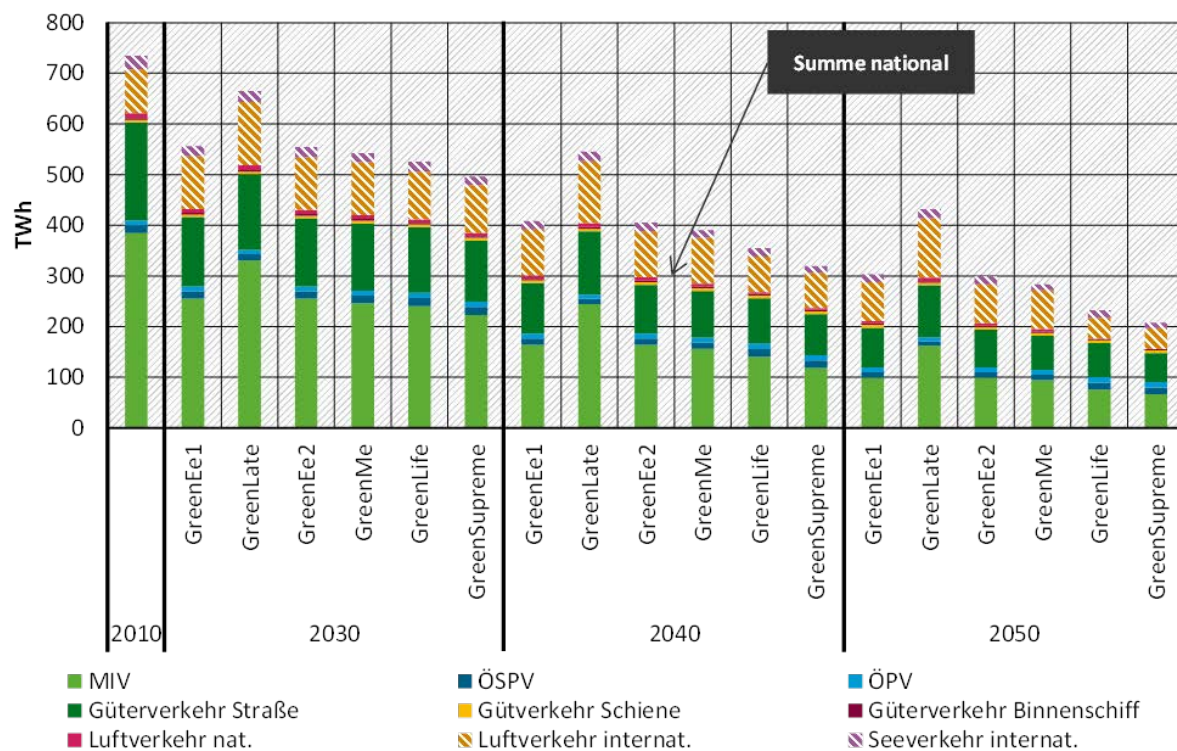
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Wir gehen davon aus, dass es bis 2050 keinen Wechsel der Antriebsarten geben wird. Gründe sind insbesondere die deutlich zu geringe spezifische Energiespeicherdichte von Akkus, sowohl

masse- als auch volumenbezogen. Im Luftverkehr werden deshalb weiterhin flüssige Kohlenwasserstoffe eingesetzt, allerdings zu immer höheren Anteilen synthetische, aus erneuerbarem Strom hergestellte Kraftstoffe. Weniger eindeutig ist die zukünftige Antriebs- und Energieversorgungsart im Seeschiffsverkehr. Hier zeichnet sich keine klar zu priorisierende Option ab. Wir gehen aber auch für diesen Bereich von flüssigen synthetischen, erneuerbar aus Strom hergestellten Kohlenwasserstoffen aus. Da also die internationalen Verkehre in Zukunft stark wachsen werden, Verlagerung bzw. Vermeidung nur bedingt möglich sind und zur Energieversorgung weiterhin flüssige Kohlenwasserstoffe erforderlich sind, werden zukünftig erhebliche Mengen an erneuerbarem PtL benötigt (vgl. Abbildung 5-66 in Kapitel 5.4.4). Konkret bedeutet dies, dass im Jahr 2030 erneuerbares PtL bereits im internationalen Luftverkehr eingesetzt und im Jahr 2040 in allen Szenarien außer GreenLate ausschließlich verwendet wird (siehe Kapitel 5.2.5). Damit dies im Flugverkehr gelingen kann, ist die steuerliche Begünstigung des Luftverkehrs abzubauen, wie die Befreiung von der Kerosinsteuer sowie die Befreiung der Mehrwertsteuer für grenzüberschreitende Flüge. Darüber hinaus müssen für die Integration von erneuerbaren strombasierten Treibstoffen die ordnungsrechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen geschaffen werden. In der UBA-Studie (UBA, 2019q) wird hierfür konzeptionell eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung von Kerosin über den europäischen Emissionshandel flankiert mit ordnungspolitischen Maßnahmen wie eine PtL-Beimischquote vorgeschlagen. Die Herstellung erneuerbaren PtLs erfordert erhebliche Kapazitäten zur erneuerbaren Stromerzeugung, große Flächen zur Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus Luft und erhebliche finanzielle Mittel für den Anlagenbau und -betrieb. Das macht den Vorrang der Energieeffizienz gegenüber der Bedarfsdeckung aus erneuerbaren Kraftstoffen ganz besonders für den Luftverkehr deutlich.

#### **5.4.4.4 Endenergieverbrauch nationaler und internationaler Verkehre**

Auf Basis der Entwicklungen im Personen- und Güterverkehr sowie bei den internationalen Verkehren ergeben sich Endenergieverbräuche des gesamten Verkehrs, siehe Abbildung 5-65.

**Abbildung 5-65: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr (nationale und internationale) nach Verkehrsmittel in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

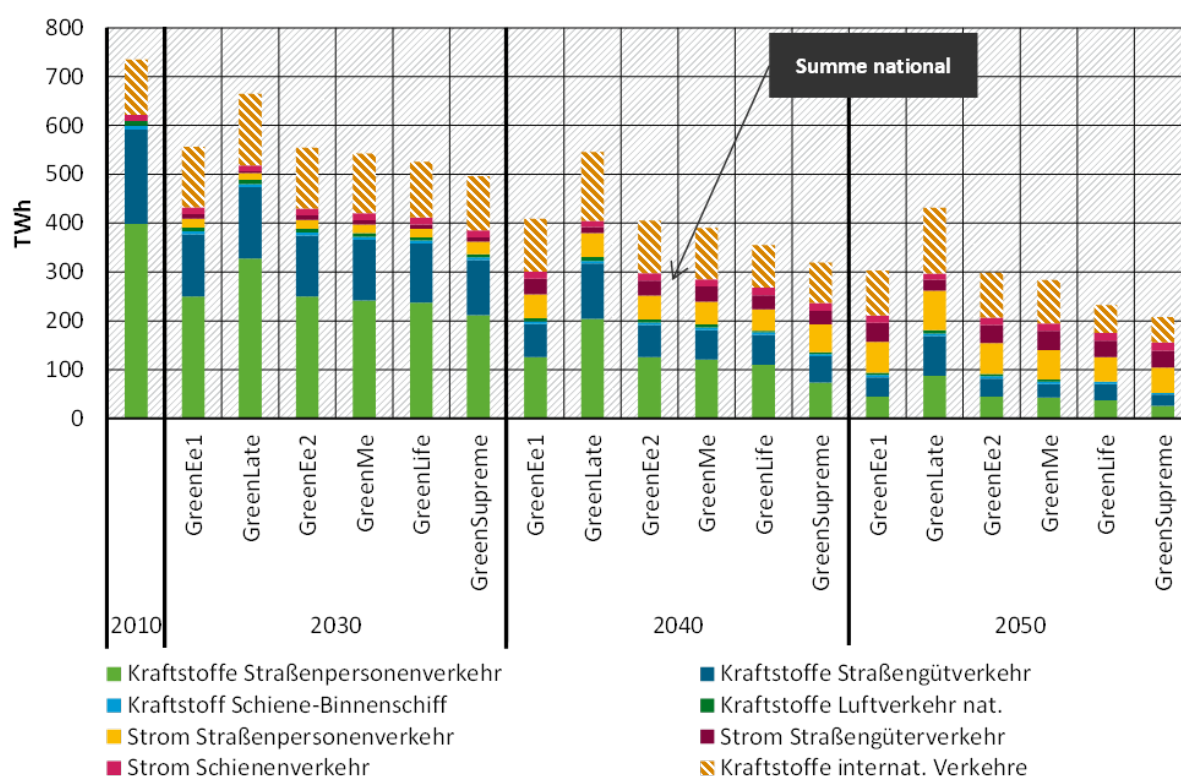
Der Endenergieverbrauch wird vom Straßenverkehr (motorisierter Individualverkehr und Straßengüterverkehr) und dem internationalen Luftverkehr dominiert. Der Schienenverkehr trägt aufgrund der geringen Verkehrsleistung und des geringen spezifischen Verbrauches weniger zum Endenergieverbrauch bei. Grund dafür ist auch der schon heute hier vorliegende große Anteil von elektrischen Antrieben. Auch der Endenergiebedarf des internationalen Seeverkehrs ist eher von nachgeordneter Bedeutung. In allen Szenarien sinkt der Endenergieverbrauch von über 700 TWh im Jahr 2010 bis 2050 deutlich. In GreenLate werden 2050 noch rund 450 TWh an Endenergie für den Verkehr benötigt, während in den anderen Szenarien der Endenergieverbrauch sogar auf 200 bis 300 TWh reduziert wird. Die Anforderung für den Endenergieverbrauch aus dem Energiekonzept der Bundesregierung von 2010 (BMWi, 2010) mit einer Minderung von 40 % im Zeitraum 2005 bis 2050 wird damit selbst unter Berücksichtigung der internationalen Verkehre erfüllt. Der Endenergieverbrauch der Inlandsverkehre nimmt dabei, ausgehend von einem Niveau von ca. 600 TWh, in 2010 bis 2050 mit 50 bis 75 % stärker ab, als der Endenergieverbrauch der internationalen Verkehre, der je nach Szenario bis zu 18 % zunimmt (GreenLate) oder bis zu 54 % abnimmt (GreenSupreme). Während der Anteil der internationalen Verkehre am Endenergieverbrauch 2010 bei rund 16 % lag, steigt er in allen Szenarien an und erreicht 2050 Anteile zwischen 24 % (Szenario GreenLife) und 31 % (Szenario GreenMe). Darin äußern sich die relativ begrenzten technischen und operativen Möglichkeiten zur Reduktion des Energieverbrauchs bei bestehender Antriebsart.

Auch in den Jahren 2030 und 2040 ist in den Szenarien außer GreenLate das hohe Ambitionsniveau der Klimaschutzmaßnahmen zu erkennen. So nimmt im kurzen Zeitraum bis 2030 der Endenergieverbrauch zwischen 24 % (GreenEe1) und 33 % (GreenSupreme) gegenüber 2010 ab – und dass, obwohl das Niveau in 2017 noch über dem von 2010 liegt.



Betrachtet man die verschiedenen Verkehrsmittel, so können die tendenziell größten Minderungen des Endenergieverbrauches im motorisierten Individualverkehr erreicht werden. Gründe dafür sind insbesondere die starke Elektrifizierung im Pkw-Verkehr sowie die Wirkung der Maßnahmen zur Vermeidung und Verlagerung von Personenverkehr. Im Straßengüterverkehr können die Verkehrsleistungen zwischen 2010 und 2050 nicht im gleichen Maße reduziert werden wie im Straßenpersonenverkehr (siehe Kapitel 5.4.3.1). Der Wandel zu elektrischen Antrieben muss dabei frühzeitig, also deutlich vor 2030 eingeleitet werden. Eine stärkere Zunahme des Stromverbrauches erfolgt zeitlich verzögert in den nachfolgenden beiden Dekaden.

**Abbildung 5-66: Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr (national und international) nach Energieträger und teilaggregierten Verkehrsmitteln in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Abbildung 5-56 zeigt den entsprechenden Endenergieverbrauch aufgeschlüsselt nach Energieträger (Kraftstoff bzw. Strom). Im Jahr 2010 ist der Schienenverkehr das einzige Strom nutzende Verkehrsmittel. Alle anderen Endenergiebedarfe in Höhe von ca. 610 TWh für nationale Verkehre und ca. 110 TWh für internationale Verkehre erfolgen in Form von Kraftstoffen, größtenteils Flüssigkraftstoffen.

Bis 2050 steigt insbesondere im Straßenverkehr der Strombedarf durch die Elektrifizierung von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen sowie durch die Einführung von Oberleitungs-Lkw<sup>89</sup> an. Bis zum Jahr 2030 nimmt der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch nationaler Verkehre auf ca. 10 bis 13 % zu (abgesehen von ca. 6 % in GreenLate). Im Jahr 2040 liegt der Anteil dann in den Szenarien außer GreenLate schon bei 32 % (GreenEe1/2, GreenMe) bis 43 % (GreenSupreme) um bis 2050 Werte zwischen 56 % (GreenEe1/2) und 67 % (GreenSupreme) zu erreichen. In GreenLate liegt der Anteil 2040 bei nur 18 %, um bis zum Jahr 2050 auf circa 39 % anzusteigen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass aufgrund der

<sup>89</sup> Kein OH-Lkw in GreenLate.

hohen Effizienz der Elektromotoren ein deutlich geringerer Endenergieverbrauch für das Zurücklegen der gleichen Strecke notwendig ist. Beim internationalen Luft- und Seeverkehr wird keine Elektrifizierung im Szenario berücksichtigt.

Der Verbrauch an Kraftstoffen nimmt im gleichen Zeitraum stark ab, und beträgt bei nationalen Verkehren 2050 nur noch zwischen rund 90 TWh (GreenEe1/2) und 50 TWh (GreenSupreme). Auch hier weichen die Ergebnisse für GreenLate mit ca. 180 TWh deutlich von den anderen Verbrauchswerten ab. In allen Szenarien werden die Kraftstoffe 2050 auf Basis erneuerbaren Stromes und damit treibhausgasneutral hergestellt, sodass die im Verkehr notwendigen THG-Minderungen dennoch erreicht werden können.

Biokraftstoffe tragen aktuell mit ca. 31,6 TWh zur Energieversorgung des Verkehrs bei (BMWi, 2019b). Der größere Teil sind Biodiesel und in geringerem Maße auch Bioethanol und Biomethan. Da 2030 in den Green-Szenarien keine extra für die energetische Nutzung im Verkehr angebaute Biomasse eingesetzt wird, kommen 2030 und in geringerem Maße auch 2040 ausschließlich fortschrittliche Biokraftstoffe auf Strohbasis (Biomass-to-Liquids) zum Einsatz, siehe Kapitel 5.2.5 und 5.2.3.2.7.

#### **TextBox 5-10: Anteile erneuerbarer Energien im Verkehr - Erneuerbare Energien Richtlinie (RED II)**

Mit der EU-Richtlinie 2018/2001 (EP & Rat der Europäischen Union, 2018a) als Neufassung der sogenannten Erneuerbare-Energien-Richtlinie (sogenannte RED II) sind EU-weite Zielwerte für den Anteil erneuerbarer Energien im Verkehrsbereich für das Jahr 2030 vorgegeben. Auch wenn die deutsche Umsetzung der Richtlinie noch aussteht, kann die Einhaltung der Zielwerte geprüft werden. Nach Anwendung von Multiplikatoren auf den Anteil von Strom und für ausgewählte sogenannte fortschrittliche Biokraftstoffe, ist ein Anteil von 14 % am Endenergieverbrauch zu erreichen.

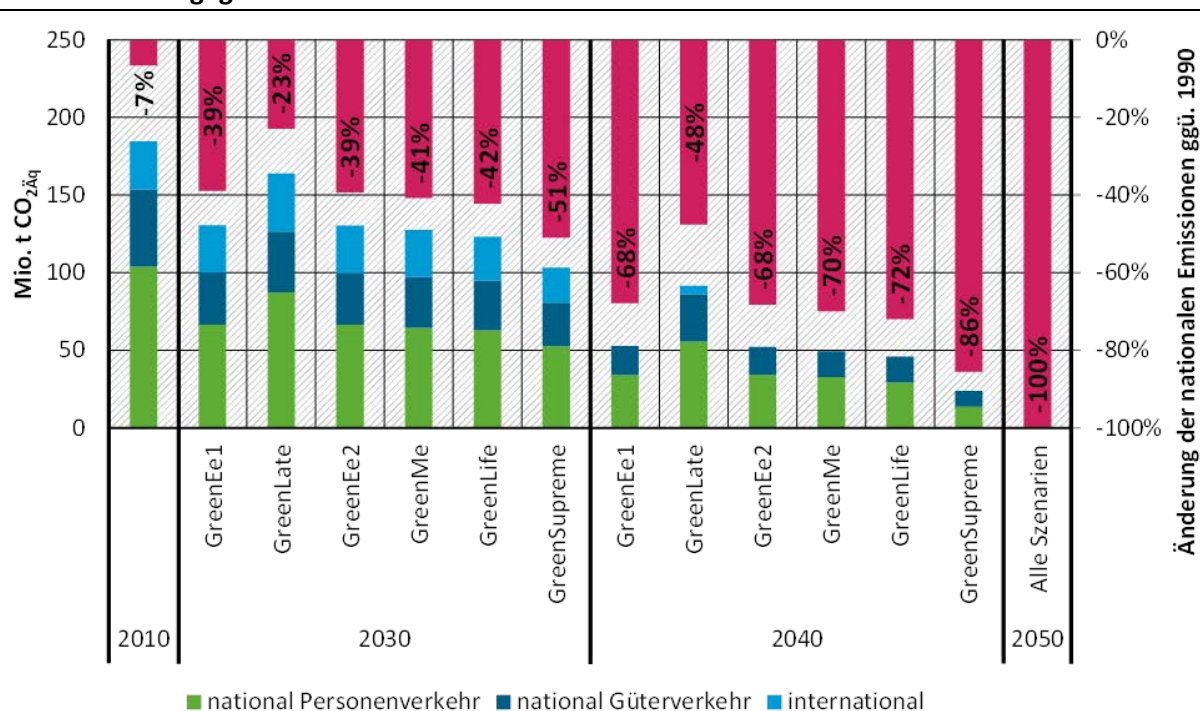
In Folge der durchgehenden Elektrifizierung in allen Bereichen des Straßenverkehrs und des sinkenden Endenergieverbrauchs im Straßen- und Schienenverkehr, des Einsatzes fortschrittlicher Biokraftstoffe (siehe Kapitel 5.2.3.2.7), sowie von erneuerbaren PtL-Kraftstoffen im Luftverkehr, siehe Kapitel 5.2.5, wird dieses Ziel in allen Szenarien deutlich übererfüllt.

Die Anteile nach RED-II-Methodik ergeben sich für das Jahr 2030 zu 21 % (GreenLate) bzw. zu knapp 35 % (GreenEe-Szenarien, GreenMe und GreenLife). In GreenSupreme wird das Ziel mit 57 % stark übererfüllt. Grund sind der stärkere Einsatz von erneuerbaren PtL-Kraftstoffen im internationalen Luftverkehr und der nur in diesem Szenario unterstellte erneuerbare PtL-Einsatz im nationalen Verkehr schon im Jahr 2030. Auch das Unterziel für fortschrittliche Biokraftstoffe nach Anhang IX, Teil A, der RED-II von 1,75 % (physisch) wird mit 3 bis knapp 5 % durch Kraftstoffe auf Basis von Stroh eingehalten. Die RED-II-Ziele könnte man auch mit weniger Stroh-basierten Kraftstoffen im Verkehr einhalten. Auch die Verwendung der erneuerbaren PtL-Kraftstoffe im Luftverkehr (national oder international) sowie im nationalen Verkehr für das Szenario GreenSupreme wäre dafür nicht notwendig.

### 5.4.5 Treibhausgasemissionen

Der Verbrauch von fossilen Endenergieträgern hat direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge, die dem Verkehrssektor zugeordnet werden.<sup>90,91</sup> Die Wirkung anderer Klimagase, die bei der Verbrennung entstehen, trägt in einem sehr geringen Maße zur Klimawirkung des Verkehrs bei.<sup>92,93</sup> In der folgenden Abbildung 5-67 sind die THG-Emissionen für die drei Bereiche nationaler Personenverkehr, nationaler Güterverkehr und internationale Verkehre aufgeschlüsselt dargestellt.

**Abbildung 5-67: Direkte THG-Emissionen im Verkehr und Änderung der nationalen Verkehre gegenüber 1990**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Bis zum Jahr 2010 sind die THG-Emissionen der nationalen Verkehre leicht gegenüber 1990 zurückgegangen. In den darauffolgenden Jahren stiegen sie allerdings wieder leicht an. Im Jahr 2017 überschritten Sie den Wert von 1990 sogar um 4 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. In allen Szenarien wird zukünftig ein Trendbruch im Verkehrssektor erreicht. Durch die Verkehrswende und die Energiewende im Verkehr gehen die THG-Emissionen bereits bis zum Jahr 2030 stark zurück. Das 2030er Sektorziel für den Verkehr des Klimaschutzplan 2050 mit einem Minderungskorridor zwischen 40 und 42 % für den nationalen Verkehr gegenüber 1990 wird in den Szenarien GreenMe und GreenLife erreicht, in GreenEe1 und GreenEe2 nur knapp verfehlt

<sup>90</sup> Der Einsatz (nachhaltig) hergestellter biogener oder strombasierter Kraftstoffe wird im Verkehr mit THG-Emissionen von null berücksichtigt. Auch THG-Emissionen, die mit der Bereitstellung der Kraftstoffe bzw. von Strom verbunden sind, werden in anderen Quellgruppen berücksichtigt. Gleichwohl werden diese Emissionen durch die Nutzung im Verkehr induziert und sind diesem damit zumindest indirekt anzulasten.

<sup>91</sup> Siehe TextBox 5-6.

<sup>92</sup> Es wird angenommen, dass Methan- und Lachgasemissionen als Teile des Abgases der Fahrzeuge durch Maßnahmen gemindert werden und damit trotz der Verbrennung von Kraftstoffen bis 2050 eine 100 % ige THG-Minderung erfolgt.

<sup>93</sup> Bei einzelnen Verkehrsmitteln gibt es auch Emissionen, deren Anteil an der Klimawirkung erheblich bis dominant sein kann (Nicht-CO<sub>2</sub>-Wirkung), etwa im internationalen Luftverkehr und Seeverkehr. Diese Wirkungen resultieren nicht aus direkt emittierten Treibhausgasen.

und in GreenSupreme deutlich übererfüllt, siehe auch Kapitel 6.1.1.2 (BMU, 2016b). Das verdeutlicht, welches Ausmaß an Veränderungen zur Einhaltung des Sektorziels 2030 erforderlich ist. Nur in GreenLate bleibt die Minderung mit 23 % deutlich hinter den notwendigen Minderungen nach dem Klimaschutzplan 2050 im Verkehr zurück. Dennoch wird die Trendwende bezüglich der THG-Emissionen zumindest eingeleitet. Auch in GreenLate ist das Tempo der Minderung von THG-Emissionen erheblich, verglichen mit den vergangenen Jahren.

Durch die Systemgrenzen der THG-Bilanzierung und die im zeitlichen Verlauf zunehmende Nutzung von Strom und alternativen Kraftstoffen gehen die Emissionen im Verkehr stärker zurück als der Endenergieverbrauch. Grund ist, dass die Nutzung von Strom als Endenergieträger im Verkehr frei von Emissionen ist, da diese Emissionen im Sektor Energiewirtschaft und damit in der Bereitstellung des Stromes berücksichtigt werden.

Bis zum Jahr 2040 gehen die THG-Emissionen in allen Szenarien gegenüber 2030 weiter stark zurück. Auch in GreenLate führt die verspätet eingeleitete Transformation dennoch zu entsprechend großen Minderungen um ca. 50 % gegenüber 1990. In den anderen Szenarien sind sie mit 68 % (GreenEe) bis 86 % (GreenSupreme) jedoch deutlich größer. In der Folge sind auch die kumulierten Emissionen<sup>94</sup> für den gesamten Zeitraum in diesen Szenarien deutlich niedriger.

Die THG-Emissionen im Bereich der internationalen Verkehre gehen im Zeitraum 2030 bis 2040 stark zurück, da bei diesen zuerst strombasierte erneuerbare Kraftstoffe eingesetzt werden. 2040 sind diese, abgesehen von GreenLate, damit schon treibhausgasneutral. Bei nationalen Verkehren erfolgt dies in allen Green-Szenarien außer GreenSupreme erst in der Dekade zwischen 2040 und 2050. In GreenSupreme kommen schon bereits ab 2030 erneuerbare PtL-Kraftstoffe im nationalen Verkehr zum Einsatz, siehe Kapitel 5.2.4.

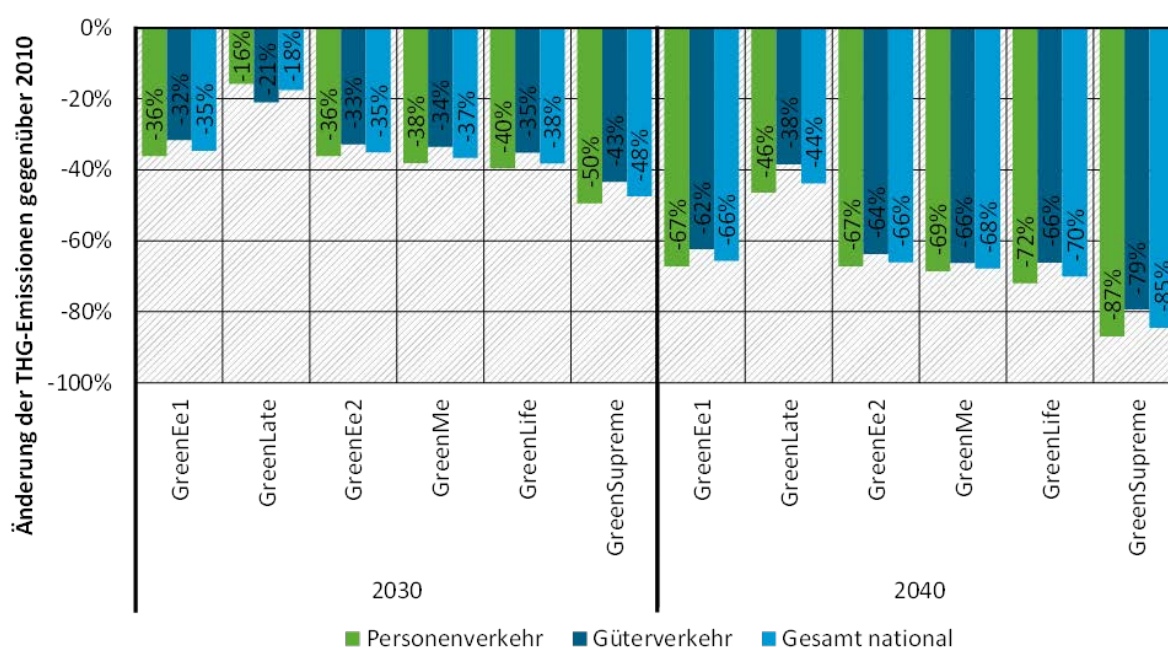
Im Jahr 2050 sinken die Emissionen in allen Szenarien entsprechend der gesetzten Annahmen auf null, da der trotz Elektrifizierung verbleibende Bedarf an Kraftstoffen ausschließlich strombasiert und erneuerbar bereitgestellt wird. Gleichwohl sind die Endenergiebedarfe in den entsprechenden Szenarien sehr unterschiedlich, insbesondere je nach Grad der realisierten Effizienzgewinne und dem Grad der Umstellung auf direkte Stromnutzung als Endenergie.

Betrachtet man die Änderungen der THG-Emissionen im nationalen Personen- und Güterverkehr (siehe Abbildung 5-68), so sieht man, dass diese in beiden Bereichen in ähnlicher Größenordnung liegen. Die Maßnahmen zur Verkehrswende und zur Energiewende greifen also in beiden Bereichen, um die THG-Emissionen zu verringern.

---

<sup>94</sup> Für die Klimawirkung sind nicht die Emissionen eines bestimmten Zieljahres ausschlaggebend, sondern die Emissionen über längere Zeiträume, also die kumulierten THG-Emissionen. Die Verweildauer von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre reicht gemäß IPCC von recht kurzzeitig bis hin zu 1.000 Jahren.



**Abbildung 5-68: Änderung der nationalen THG-Emissionen im Verkehr gegenüber dem Jahr 2010**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

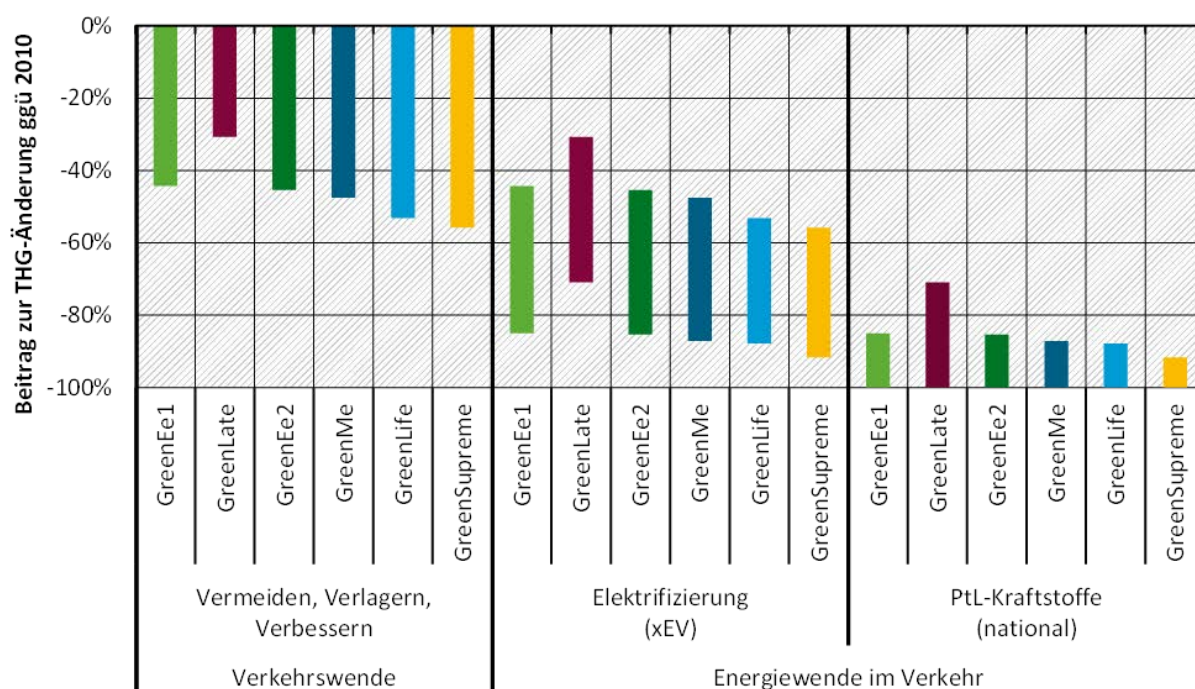
Durch die stärkere Elektrifizierung im Personenverkehr gegenüber dem Güterverkehr und auch die unterschiedlichen Entwicklungen der Verkehrsleistungen sind die Minderungen im Personenverkehr im Allgemeinen etwas größer als im Güterverkehr. Nur in GreenLate im Jahr 2030 ist dies umgekehrt der Fall. Bis zum Jahr 2040 ergibt sich hier der größte prozentuale Unterschied. Gründe sind, dass im Güterverkehr kein OH-Lkw zum Einsatz kommt und der elektrische Fahrleistungsanteil damit deutlich geringer ist als in den anderen Szenarien. Im Jahr 2050 wurde in allen Szenarien erfolgreich ein treibhausgasneutraler Verkehr erreicht und die Minderungen betragen sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr 100 %. Das gilt ebenso für den Deutschland zurechenbaren Anteil an den internationalen Verkehren.

#### 5.4.6 Beiträge der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr in den Szenarien

Das notwendige Zusammenspiel der Verkehrswende und der Energiewende im Verkehr zur Erreichung der Klimaschutzziele (siehe Kapitel 5.4.1) wird in der Umsetzung der Maßnahmen der verschiedenen Green-Szenarien deutlich. Die jeweiligen Beiträge zur THG-Minderung können allerdings nur näherungsweise abgeschätzt werden und sind in der folgenden Abbildung 5-69 dargestellt (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e; UBA, 2016c).<sup>95</sup>

<sup>95</sup> Da kein Referenzszenario entwickelt wurde, erfolgt die Abschätzung der Beiträge zur THG-Minderung für das Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2010. In einem Referenzszenario hätte die Verkehrsleistung zwischen 2010 und 2050 noch stärker bzw. überhaupt ansteigen können, sodass der Beitrag der Verkehrswende zur THG Minderung dann größer ausfallen würde.

**Abbildung 5-69: Beitrag zur Änderung der nationalen THG-Emissionen im Verkehr im Jahr 2050 gegenüber dem Jahr 2010**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) mit eigenen Abschätzungen auf Basis von „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ (UBA, 2016c).

Hinweis: Die Beiträge wurden in der Reihenfolge von links nach rechts bestimmt. Würde man zuerst die Elektrifizierung anwenden und anschließend die Verkehrswende, würde erstere stärker mindern und letztere geringer. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich für die erneuerbaren PtL Kraftstoffe aufgrund der gewählten Darstellung.

Die verschiedenen Maßnahmen im Bereich der Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie der Verbesserungen der Effizienz des Verkehrssystems und der Fahrzeuge sorgen dafür, dass die Verkehrswende in den meisten Green-Szenarien einen großen Beitrag leistet. Trennt man die Bausteine Elektrifizierung und alternative Kraftstoffe auf, so leistet die Verkehrswende sogar in allen Szenarien außer GreenLate den größten Beitrag. In GreenLate liegt der Beitrag zur THG-Minderung bei ca. 30 % gegenüber 2010. In den anderen Szenarien sind es zwischen knapp 45 % (GreenEe1/2, GreenMe) und ca. 55 % (GreenSupreme).<sup>96</sup> Abgesehen von GreenLate liegen die Szenarien damit im in Kapitel 5.4.1 gezeigten Korridor von 40 % bis 60 % gegenüber 1990.

Die verbliebenen THG-Emissionen müssen durch die Energiewende im Verkehr gemindert werden. Die Elektrifizierung als Teil der Energiewende im Verkehr verringert diese Emissionen noch einmal deutlich. Die Unterschiede der Beiträge zur Minderung zwischen den Szenarien sind dabei relativ gering. Die Beiträge zur Minderung selbst liegen in allen Szenarien zwischen 35 und 40 % gegenüber 2010.<sup>97</sup>

Zur Erreichung des treibhausgasneutralen nationalen Verkehrs 2050 muss die verbliebene Minderungslücke durch erneuerbare PtL-Kraftstoffe geschlossen werden. Der Beitrag zur Minderung in den verschiedenen Szenarien liegt zwischen 8 % (GreenSupreme) und 29 % (GreenLate) gegenüber 2010.

<sup>96</sup> Gegenüber dem Jahr 1990 mit höheren THG-Emissionen als im Jahr 2010 betragen die Minderungen durch die Verkehrswende ca. 35 % (GreenLate) bzw. liegen in den anderen Szenarien zwischen 47 % (GreenEe1) und ca. 58 % (GreenSupreme).

<sup>97</sup> Der absolut gesehen höhere Beitrag der Elektrifizierung zur THG-Minderung in GreenLate, resultiert auch aus der Methodik. Die verbliebenen 70 % der Emissionen liegen höher als in den anderen Szenarien und müssen nach der Energiewende im Verkehr dennoch auf null reduziert werden. Die Energiewende muss daher stärker beitragen.

### 5.4.7 Rohstoffe

Die getroffenen Annahmen für den Verkehrssektor zur Ausgestaltung der Szenarien führen im zeitlichen Verlauf zu sich erheblich verändernden Rohstoffbedarfen (vgl. Abbildung 5-70). Vor allem der Trend zur Elektrifizierung der Verkehrsmittel, hier in erster Linie als batterieelektrische Mobilität, führt zu massiven Veränderungen hinsichtlich Art und Menge der nachgefragten Rohstoffe (vgl. auch Kapitel 5.4.7.2). Daneben gibt es weitere Trends mit Einfluss auf die Rohstoffarten und -mengen: der Leichtbau von Fahrzeugen (Kapitel 5.4.7.1), technische Effizienzsteigerungen an Fahrzeugen und der Einsatz anderer Kraft- und Treibstoffe. Zudem gibt es extern getriebene Trends mit Auswirkungen auf die Güterverkehrsleistung – etwa die sich verringernden Bedarfe an fossilen Energieträgern und ein gesteigertes Recycling von Materialien, was den weiträumigen Transport von Primärrohstoffen reduziert. Einige Aspekte werden im Folgenden näher betrachtet.

#### 5.4.7.1 Pkw-Leichtbau

Leichtbau spielt insbesondere bei batterieelektrischen Fahrzeugen eine wichtige Rolle, da so das zusätzliche Gewicht der Batterie teilweise kompensiert werden kann. Die positive Wirkung des Leichtbaus auf den Rohstoffbedarf der Fahrzeugherstellung wurde bereits in verschiedenen Studien gezeigt (z. B. (Dittrich et al., 2018; Öko-Institut et al., 2016)).

Auch wenn in der Vergangenheit, bedingt durch höhere Sicherheitsanforderungen und einen verbesserten Komfort für die Nutzer, die Fahrzeuggewichte angestiegen sind, dürften zukünftige Anforderungen zur Senkung des Energieverbrauches auch verstärkt zu Leichtbau auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Plug-In-Hybridelektrofahrzeugen führen. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen ist Leichtbau bereits heute eine wichtige Maßnahme. Daher wird in allen Green-Szenarien eine Reduktion der Fahrzeuggewichte durch Leichtbau in Anlehnung an (Öko-Institut et al., 2016) angenommen.

Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten:

- Zum einen kann der Materialbedarf konstruktiv durch eine optimierte Bauweise und den Einsatz hochfester Stähle reduziert werden.
- Zum anderen können vor allem Stahlbauteile durch leichtere Materialien wie z. B. Aluminium oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) substituiert werden. Dabei werden zwischen 0,5 kg und 0,8 kg Aluminium benötigt, um 1 kg Stahl zu ersetzen. Bei CFK wird bereits heute eine Gewichtseinsparung von über 60 % gegenüber Stahl erreicht. Es ist hier jedoch zu bedenken, dass im Gegensatz zu Stahl eine stoffliche Verwertung auf gleichem Qualitätsniveau für CFK aktuell nicht möglich ist.<sup>98</sup>

**Tabelle 5-24: Anteil unterschiedlicher Leichtbauvarianten an den Pkw Neuzulassungen in den Green-Szenarien**

		10 % Leichtbau	20 % Leichtbau	30 % Leichtbau
	Haupt-substitutions-material	Aluminium	Aluminium	CFK

<sup>98</sup> Aktuell kann die duroplastische Kunststoffmatrix nur energetisch verwertet werden. Die Kohlenstofffasern können zwar zurückgewonnen werden (VDI ZRE, 2016), sind aufgrund der Verkürzung jedoch nur für andere Einsatzbereiche z. B. Spritzguss von Maschinenbauteilen, Innenverkleidungen oder als Bauteile für Fahrzeugelektronik geeignet.

		10 % Leichtbau	20 % Leichtbau	30 % Leichtbau
<b>GreenEe 1+2</b>	<b>2030</b>	100 %	-	-
	<b>2050</b>	-	100 %	-
<b>GreenLate</b>				
<b>GreenLife</b>				
<b>GreenMe</b>	<b>2030</b>	-	100 %	-
	<b>2040</b>	-	50 %	50 %
<b>GreenSupreme</b>				

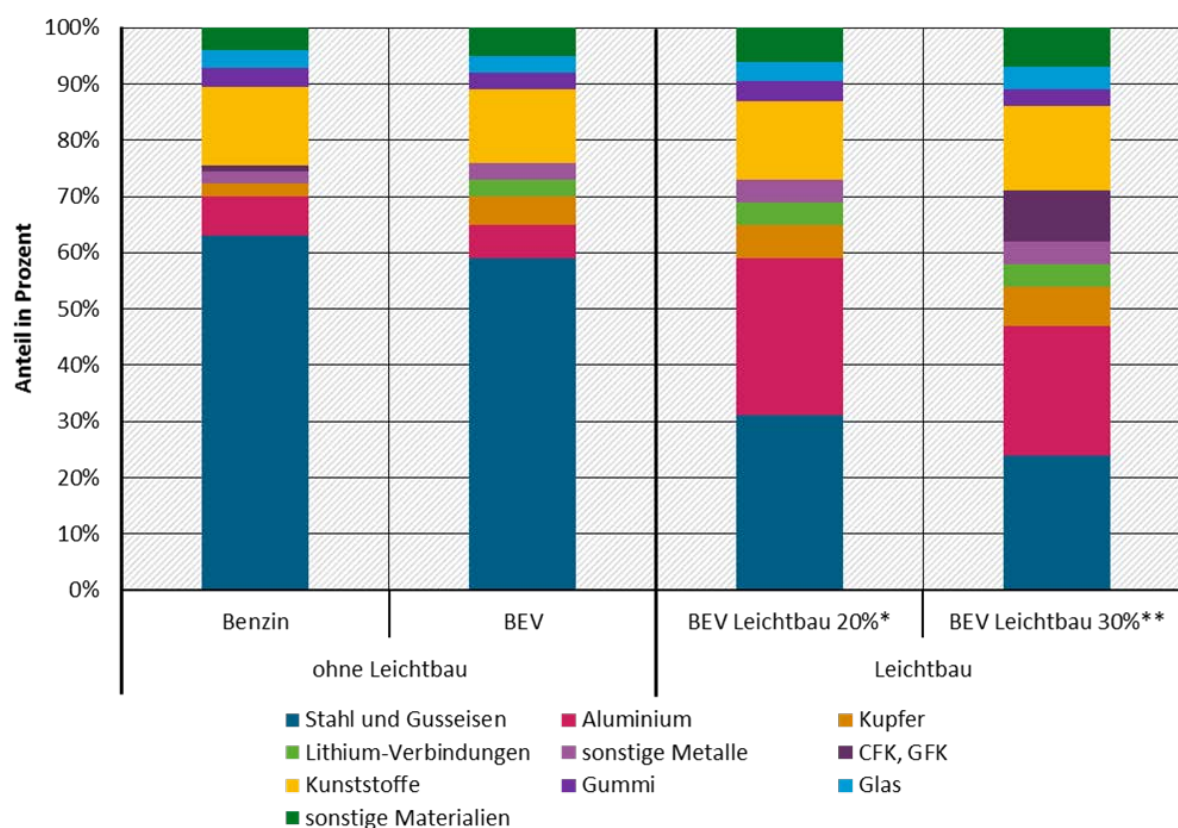
Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Tabelle 5-24 zeigt den Anteil unterschiedlicher Leichtbauvarianten für neu zugelassene Pkw in den Stützjahren der jeweiligen Green-Szenarien. Dabei wird bei 10 % Leichtbau durch den Einsatz von Aluminium und hochfesten Stählen sowie eine generelle Fahrzeugverkleinerung eine anteilige Gewichtsreduktion von Karosserie und Antriebsstrang auf 90 % des Ausgangsgewichtes erreicht. Eine 20 prozentige Gewichtsreduktion (20 % Leichtbau) wird durch 10 % weniger Stahlmaterial aufgrund des Einsatzes von hochfesten Stählen sowie durch eine Substitution von 70 % der übrigen Stahlkomponenten durch Aluminium sowie Downsizing erreicht. Um eine 30 prozentige Gewichtsreduktion zu erzielen ist die Substitution von Stahl mit Aluminium (65 %) und CFK (35 %) notwendig.

Auch für die Lkw und leichten Nutzfahrzeuge wird eine Gewichtseinsparung durch Leichtbau pauschal angesetzt. In allen Green-Szenarien führt dies ab 2030 bei neu zugelassenen Solo-Lkw zur Verminderung des Leergewichts um 6 %, bei Last- und Sattelzügen sowie leichten Nutzfahrzeugen um 10 %. Bei Materials substitutionen für Nutzfahrzeuge kommen keine CFK-Bauteile, sondern ausschließlich Aluminium zum Einsatz.

Im Ergebnis führt der verstärkte Einsatz von Leichtbau zu einer deutlichen Verschiebung der Materialzusammensetzung der Fahrzeuge, wie in Abbildung 5-70 zu sehen ist. So reduziert sich der Anteil von Stahl und Gusseisen an der Materialzusammensetzung eines Pkw um die Hälfte, wohingegen um den Faktor 4 bis 5 höhere Einsätze an Aluminium zu verzeichnen sind. Durch die Umstellung von Verbrennungsmotoren auf batterieelektrische Fahrzeuge mit Elektromotoren erhöht sich zudem der Anteil an Kupfer und Lithiumverbindungen. Insgesamt kann je nach Szenario durch den Leichtbau im Pkw-Bereich eine zusätzliche Effizienzsteigerung der Fahrzeuge von rund 3 bis 5 % erzielt werden (siehe Kapitel 5.4.4.1).



**Abbildung 5-70: Materialzusammensetzung Pkw mit und ohne Leichtbau**

\* entspricht GreenEe1, GreenEe 2, GreenLate und GreenLife im Jahr 2050

\*\* entspricht GreenMe und Greensupreme im Jahr 2050

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Öko-Institut et al., 2016)

#### 5.4.7.2 Akkumulatoren

Der Bedarf an Materialien für Elektro-Pkw und insbesondere für die Fahrzeugbatterien hängt von deren Markthochlauf, von der Entwicklung der Anzahl der Pkw-Neuzulassungen und zunehmend auch von der Entwicklung des Bestands ab. In allen Szenarien – auch in GreenLate – ist ein zügiger Hochlauf der Elektromobilität angenommen<sup>99</sup>, sodass die Unterschiede zwischen den Szenarien gering ausgeprägt sind.

Die Zahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen weist in den Szenarien recht gleichmäßige Tendenzen auf. Ausgehend von ca. 3 Mio. Neuzulassungen im Jahr 2010 verharrt 2050 in GreenLate die Anzahl etwa auf diesem Niveau, während sie in GreenEe auf ca. 2 Mio. und in GreenLife auf etwa 1 Mio. zurückgeht. In GreenLife werden große Anteile der Verkehrsleistung durch Car- und Ridesharing erbracht. Diese Formen der Fahrzeugnutzung weisen die weitaus höchsten spezifischen Fahrleistungen auf und führen zu maximaler Materialausnutzung. Anders verhält es sich bei privat genutzten Pkw. Sie dominieren in den Szenarien GreenEe, GreenLate und GreenMe auch 2050 noch mit Anteilen größer 80 % den Fahrzeugbestand. Die vergleichsweise geringen täglichen Fahrzeiten machen es zu einem stehenden Materiallager.

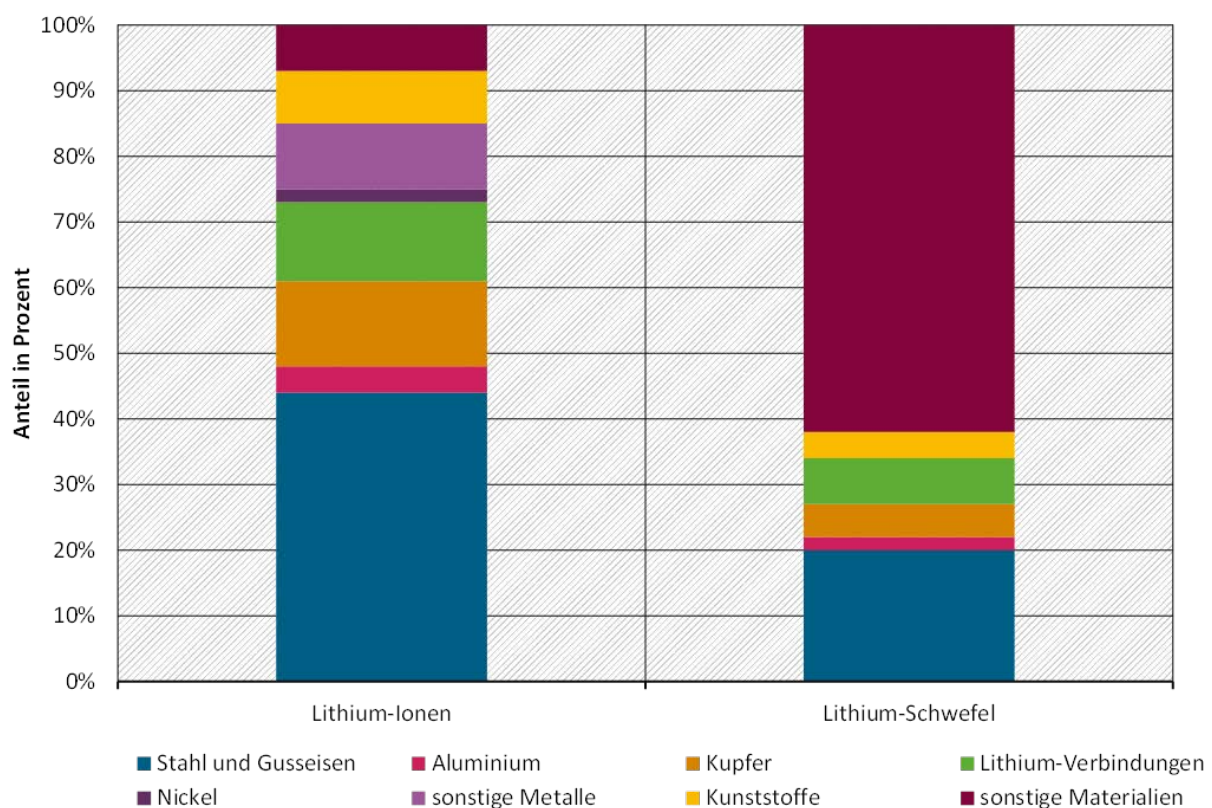
Damit wird 2050 der Fahrzeugbestand die bestimmende Größe, der in GreenLate mit 38 Mio. E-Pkw (von knapp 50 Mio. Pkw) noch deutlich höher liegt als in GreenEe mit 36 Mio. E-Pkw (von

<sup>99</sup> Alle Szenarien sind so gestaltet, dass 2050 weitgehende THG-Neutralität erreicht werden kann. Manche Sektoren, wie auch der Verkehr, müssen dann vollständig THG-neutral sein. Dafür ist weitgehende Pkw-Elektromobilität der Fahrzeuge im Bestand eine notwendige Voraussetzung.

42 Mio.) und in GreenSupreme mit 27 (von 29) Mio. E-Pkw. Damit hat GreenLate den höchsten Bedarf an elektromobilitätsspezifischen Materialien – trotz niedrigster Elektroanteile.

In allen Green-Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Energiedichte der Li-Ionen-Akkus gegenüber heute auf 155 Wh/kg in 2030 gesteigert werden kann. Bis 2030 setzen alle Pkw die derzeit üblichen Li-Ion-Zelltypen (Nickel-Mangan-Kobalt, Nickel-Kobalt-Aluminium, Lithium-Eisenphosphat-Zellen) in ähnlichen Anteilen ein (Drittel-Mix); Lkw nutzen bis 2030 lediglich Lithium-Eisenphosphat-Akkus. Post-Li-Ionen-Akkus (hier Li-Schwefel-Akkus) werden verstärkt ab 2040 zum Einsatz kommen. Diese weisen in 2050, eine Energiedichte von 350 Wh/kg auf. Aufgrund der deutlich höheren Energiedichte besitzen die Lithium-Schwefel-Akkus ein geringeres spezifisches Gewicht. Zudem wird hier der Bedarf an Lithium-Verbindungen, Nickel, Kupfer und sonstigen Metallen deutlich reduziert, wie Abbildung 5-71 zeigt.

**Abbildung 5-71: Materialzusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (2010) und Lithium-Schwefel-Akkumulatoren (2050)**



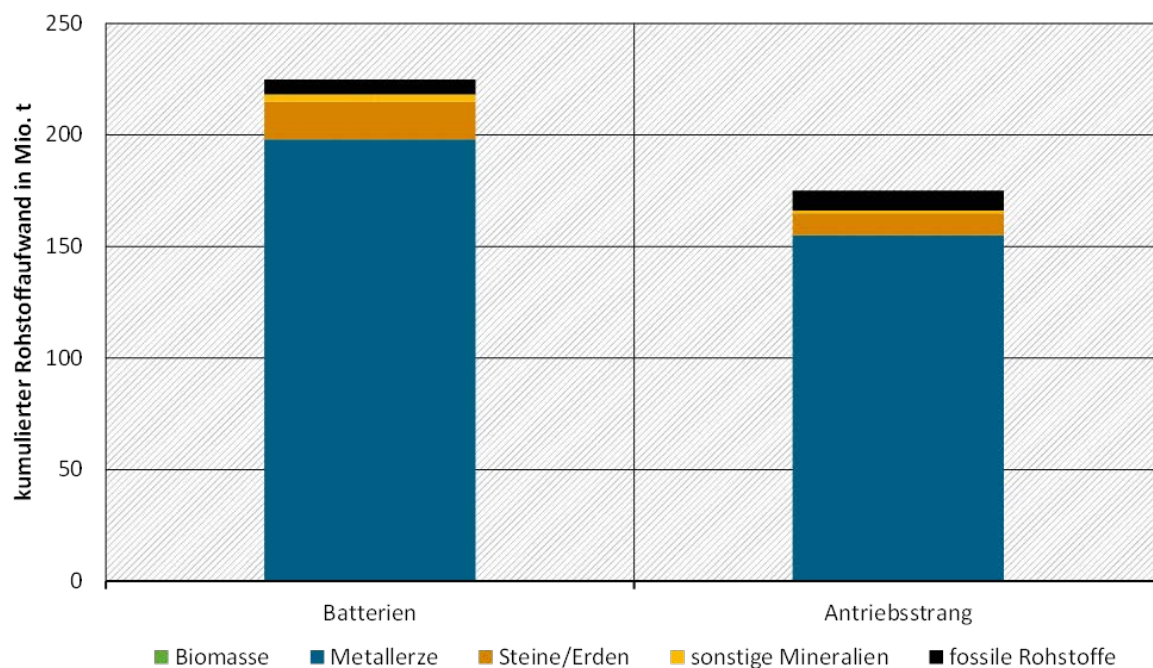
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Öko-Institut et al., 2016)

Neben der Energiedichte und dem Anteil der verschiedenen Zelltypen wird auch die Reichweite der Akkumulatoren gegenüber heute angepasst. Die Reichweitenentwicklungen in den Green-Szenarien wurden u. a. aus den Trends bei aktuellen Fahrzeugmodellen sowie auf Basis von in jüngerer Vergangenheit von den Kfz-Herstellern gemachten Ankündigungen für zukünftige Modelle getroffen (Utopia Team, 2019). In GreenMe und GreenSupreme wird davon ausgegangen, dass bei einem ausreichenden Ausbau der Schnellladeinfrastruktur auch Batterien mit geringeren Reichweiten ohne weitergehende Verhaltensänderungen bei den Pkw- Nutzern eingesetzt werden können. Daher werden in diesen beiden Szenarien die Reichweiten gegenüber GreenEe1 je nach Fahrzeuggröße und -konzept um etwa 10-30 % reduziert. Die unterstellten Reichweiten in den Green-Szenarien zeigt Tabelle 5-25.

**Tabelle 5-25: Angenommene durchschnittliche Reichweiten der Akkumulatoren neu zugelassener Pkw in den Green-Szenarien**

		GreenEe1+2/ GreenLate/ GreenLife		GreenMe/GreenSupreme	
		2030	2050	2030	2050
BEV	Reichweite in km				
	Pkw groß	300	500	300	400
	Pkw mittel	300	400	200	300
PHEV	Pkw klein	150	300	150	200
	Pkw groß	50	80	50	70
	Pkw mittel	50	80	40	60
	Pkw klein	50	80	40	60

Abbildung 5-72 zeigt exemplarisch den kumulierten Rohstoffaufwand von 2010 bis 2050 für Fahrzeugbatterien und den Antriebsstrang von batterie elektrischen Fahrzeugen für das GreenEe1-Szenario. Es ist zu erkennen, dass der Rohstoffaufwand sehr stark von metallischen Rohstoffen dominiert wird.

**Abbildung 5-72: kumulierter Rohstoffaufwand von 2010 bis 2050 für Akkumulatoren und Antriebsstrang im GreenEe1-Szenario**

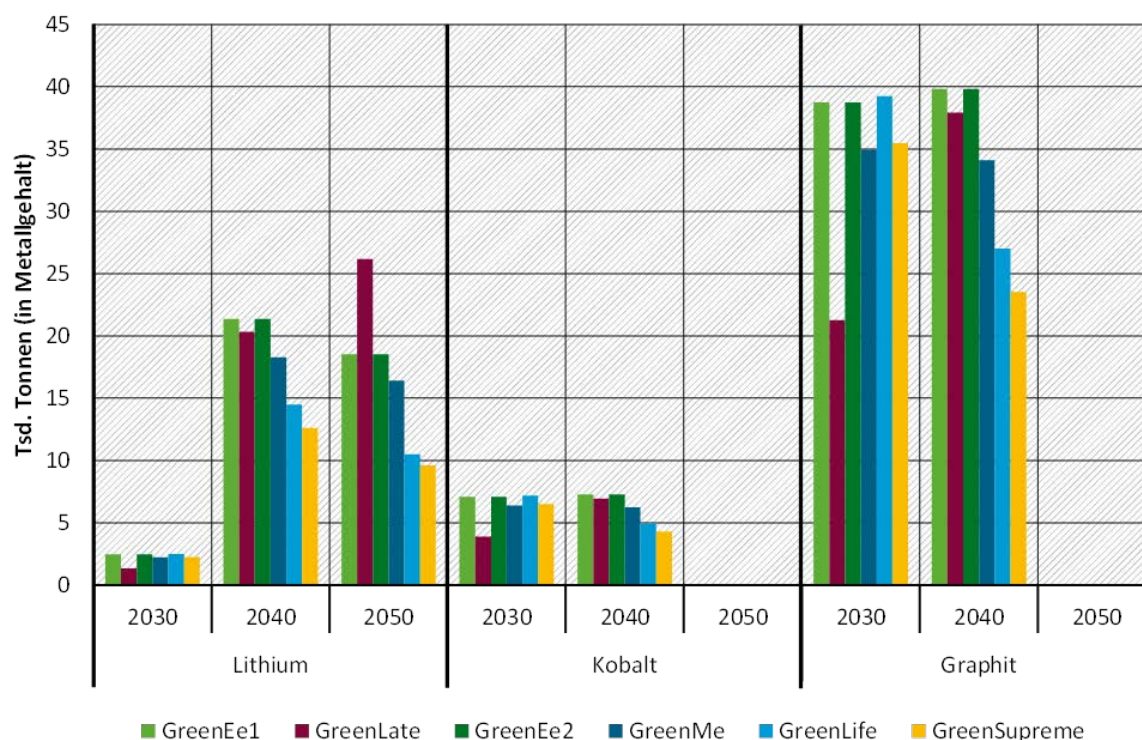
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a)

Dieser ist zu großen Teilen auf den Beitrag der Lithium-Ionen-Akkus und ihrem hohen Anteil an metallischen Rohstoffen zurückzuführen. Der Effekt der zunehmenden Einführung der Lithium-Schwefel-Akkus ab 2040 auf die Nachfrage nach batteriespezifischen Rohstoffen zeigt Abbildung 5-73. Es ist zu erkennen, dass der Bedarf an Kobalt und Graphit in 2050 auf null zurückgeht, da diese beiden Rohstoffe in den Lithium-Schwefel-Akkus nicht mehr zum Einsatz kommen. Auch der reduzierte Lithiumbedarf in den Green-Szenarien, außer bei GreenLate, in 2050 ist zu einem



Teil auf den geringeren Bedarf an Lithiumverbindungen in den Post-Lithium-Ionen-Akkus zurückzuführen.

**Abbildung 5-73: Bedarf an für Akkumulatoren relevanten Rohstoffen in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Gut zu erkennen ist auch die Auswirkung zum Markthochlauf und Bestand an Elektrofahrzeugen auf den Bedarf an Lithium. Während GreenLate in 2030 noch den geringsten Bedarf der Green-Szenarien an Lithium aufweist, liegt er aufgrund der hohen Anzahl an Elektrofahrzeugen in 2050 um das 2,7-fache über dem Bedarf von GreenSupreme. GreenLife und GreenSupreme weisen im Vergleich zu den weiteren Green-Szenarien ab 2040 aufgrund der geringeren absoluten Anzahl an Elektrofahrzeugen den geringsten Bedarf an den dargestellten Batterierohstoffen auf. Der Rohstoffeinspareffekt der verringerten Reichweiten der Akkumulatoren zeigt sich durch den Vergleich von GreenMe zu GreenEe1 und GreenEe2 bzw. von GreenSupreme zu GreenLife. Neben den hier dargestellten Rohstoffen Lithium, Kobalt und Graphit erhöht sich auch der Bedarf an weiteren Metallen, insbesondere Kupfer durch die Elektromobilität im Vergleich zu den heutigen Verbrennungsmotoren (vgl. auch Abbildung 5-70).

Gerade der Bedarf an den für die Akkumulatoren benötigten Rohstoffe, vor allem Lithium und Kobalt, wirft die Frage nach einer Einschränkung der Umsetzbarkeit der Elektromobilität aufgrund der Rohstoffverfügbarkeiten auf. Dies gilt umso mehr bei einer erwünschten globalen Umstellung auf Elektromobilität. Für die Green-Szenarien wird der Bedarf Deutschlands an Primärkobalt für Batterien in den Jahren 2030 und 2040 auf etwa 3 bis 6 % der aktuellen globalen Produktion geschätzt, der Bedarf Deutschlands an Lithium im Jahr 2050 entspricht einem Anteil von 37 bis 102 % der momentanen global geförderten Menge an Lithium. Es ist hierbei jedoch zu bedenken, dass in den Green-Szenarien kein explizites Recycling der Fahrzeugbatterien in den Rohstoffbetrachtungen unterstellt wurde. Vielmehr wurden die zu ersetzenden Fahrzeugbatterien einer Second-Life-Nutzung im Energiesystem zugeführt. Diese Annahme basiert im Wesentlichen darauf, dass aktuell Recyclingkonzepte für Fahrzeugbatterien in der Entwicklung sind und somit keine Abschätzungen zur Gewinnung von

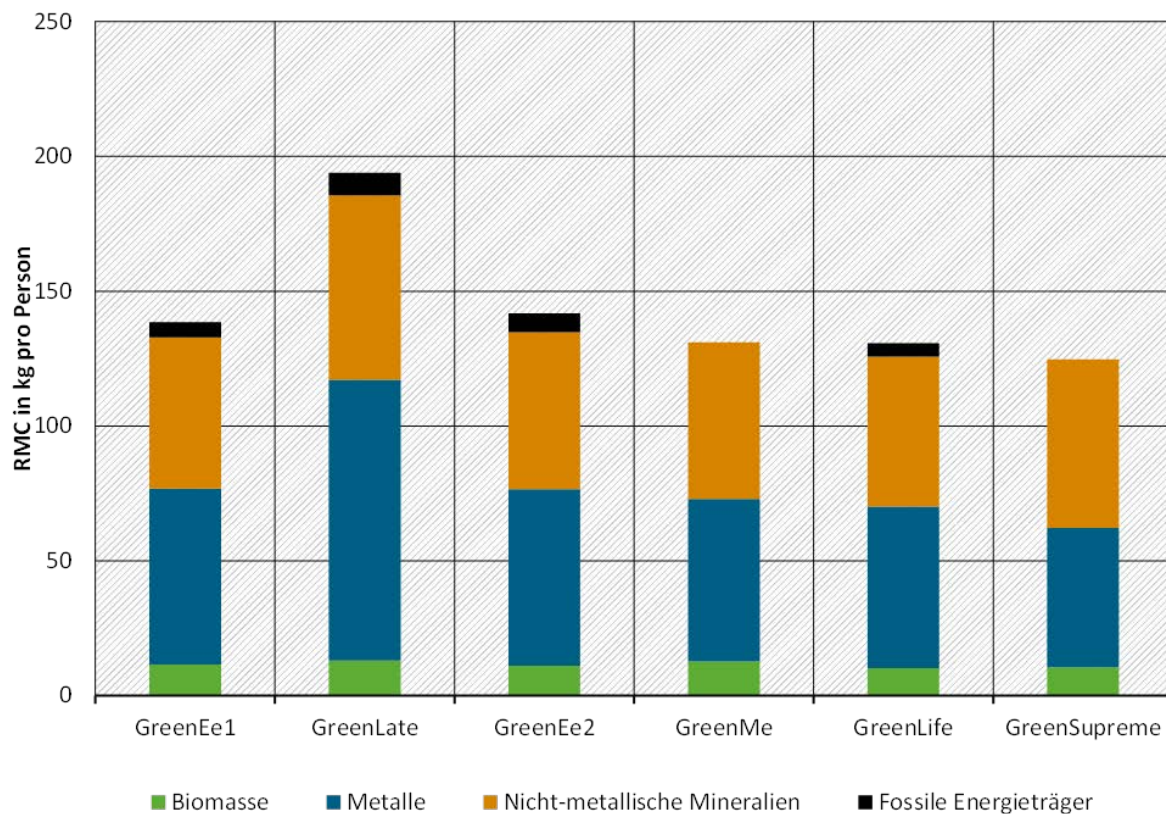


Sekundärrohstoffen getroffen werden könnten. Es ist aber davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren entsprechende Konzepte und Anlagen Marktreife erreichen werden und somit der Bedarf auch durch Sekundärmaterialien gedeckt werden kann. Weitere Ausführungen hierzu sind auch in Kapitel 6.2.4 zu finden.

#### 5.4.7.3 Primärrohstoffkonsum durch Mobilität

Der Rohstoffkonsum pro Kopf für das Bedürfnisfeld Mobilität verändert sich in den Green-Szenarien bis 2050 deutlich. Während in 2010 Mobilität mit rund 1,35 t pro Person ca. 16 % des gesamten Rohstoffkonsums privater Haushalte betrug, reduziert sich der Beitrag in den Green-Szenarien in 2050 auf rund 5 (GreenSupreme) bis 6 % (GreenLate). Insgesamt reduziert sich der Rohstoffkonsum für Mobilität gegenüber 2010 in den Green-Szenarien zwischen 85 (GreenLate) und 92 % (GreenSupreme) aufgrund der jeweiligen szenariospezifischen Annahmen zur Elektromobilität, aber auch der Materialeffizienzen und weiteren rohstoffrelevanten Annahmen.

**Abbildung 5-74: Rohstoffkonsum pro Kopf in den Green-Szenarien für das Bedürfnisfeld Mobilität in 2050**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Während in 2010 der Rohstoffkonsum für das Bedürfnisfeld Mobilität zu gut zwei Dritteln von fossilen Energieträgern, im Wesentlichen von Kraftstoffen dominiert wird, überwiegen in 2050 die Bedarfe an Metallen und nicht-metallischen Mineralien (Abbildung 5-74). Der geringe Anteil fossiler Energieträger in GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife ist auf die Vorprodukte im Ausland zurückzuführen, da diese entsprechend der Szenariocharakteristika noch nicht vollständig dekarbonisiert sind.

#### 5.4.8 Schlussfolgerungen für den Transformationspfad

Der Verkehr hat, im Gegensatz zu anderen Bereichen, bisher keinen Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Seine Emissionen lagen 2017 sogar höher als im Jahr 1990. Ein „weiter wie bisher“ im Verkehr gefährdet die deutschen Klimaschutzziele, da der Verkehrssektor bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral werden muss. Die Szenarien zeigen auf, wie eine Transformation zu einem klimaverträglichen und ressourcenschonenden Verkehr aussehen kann. GreenLate zum Beispiel, welches im Verkehr kein ausschließliches „weiter wie bisher“ Szenario ist, zeigt, dass eine zu späte Einleitung der Transformation für die Erreichung der Ziele nachteilig ist. Der Schlüssel zu einer aus volkswirtschaftlicher Sicht effektiven Gestaltung eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Verkehrs liegt in einer Kombination aus Verkehrswende sowie einer Energiewende im Verkehr. Zu ihrer Umsetzung sind folgende Schritte möglichst schnell erforderlich:

- ▶ Neben der Verbesserung der Energieeffizienz spielen Verkehrsvermeidung und die Verlagerung auf den Umweltverbund im Personenverkehr eine zentrale Rolle für die dringend notwendige **Verkehrswende**. Um Vermeidung und Verlagerung zu erreichen, sind einerseits Energiesteuern auf fossile Kraftstoffe zu erhöhen und umweltschädliche Subventionen abzubauen (z. B. Dieselsteuer- und Dienstwagenprivileg, Pendlerpauschale), andererseits Anreize zu schaffen, Wegstrecken zu reduzieren („Stadt der kurzen Wege“) und mehr Wege mit dem Umweltverbund – dies schließt auch aktive Mobilitätsformen wie Rad- und Fußverkehr ein – zurücklegen zu können. Da die vollständige Wirkung dieser Maßnahmen sich erst mittel- bis langfristig entfaltet, sind die Instrumente schnellstmöglich politisch zu beschließen, die Umsetzung unmittelbar zu beginnen und die Intensität der Instrumente im Zeitverlauf – wo notwendig – noch weiter zu verstärken. Spätestens ab dem Jahr 2030 sollten Fahrzeuge viel stärker als heute geteilt genutzt werden. Durch Ridesharing und die damit verbundene Erhöhung der Auslastung sind weitere Verbesserungen in Klimaschutz und Ressourcenschonung möglich, wenn durch gesetzliche Rahmenbedingungen sichergestellt wird, dass diese Fahrten zu Lasten des MIV – und nicht des ÖV – erfolgen.
- ▶ Eine zentrale Maßnahme der **Verkehrswende** im Güterverkehr ist die Verkehrsverlagerung. Dazu sind zusätzliche Maßnahmen umzusetzen, die Verkehr auf Schiene und Binnenschiff verlagern, indem sie einerseits die Attraktivität dieser Alternativen erhöhen (z. B. Ausbau der Infrastruktur des Schienengüterverkehrs inkl. Umschlagseinrichtungen), andererseits den Güterverkehr auf der Straße durch eine Anlastung der Umweltkosten verteuern (z. B. über eine Ausweitung und Erhöhung der Lkw-Maut). Zusätzlich ist durch eine nachhaltige und klimaverträgliche Wirtschaftsentwicklung das Wachstum des Verkehrsaufkommens zu reduzieren bzw. das Aufkommen zu senken, um mit den vorhandenen Transportpotenzialen bzw. zu schaffenden zusätzlichen Kapazitäten von Schiene und Binnenschiff größere Anteile des Güterverkehrs abdecken zu können (Erhöhung des Modal-Split-Anteils). Auch hier muss es darum gehen, die Maßnahmen schon vor 2030 einzuleiten und dann schrittweise zu verstärken.
- ▶ Weiterhin sind in der Transformationsphase zugelassene konventionelle Fahrzeuge insbesondere im Zeitraum bis 2030 als weitere zentrale Maßnahme der **Verkehrswende** noch kraftstoffeffizienter auszuliegen. Über die EU-Instrumente zu CO<sub>2</sub> Anforderungen für

neue Pkw, LNF und schwere Nutzfahrzeuge ist dies möglich. Jedoch ist es so, dass bei einer schnellen und starken Marktdurchdringung von E-Fahrzeugen durch diese Instrumente keine ausreichend großen Anreize zu Verbesserungen der technischen Effizienz der konventionellen Fahrzeuge vorhanden sind, falls die CO<sub>2</sub>-Anforderungen nicht entsprechend nachgeschärft werden.

- ▶ Elektromobilität ist der zentrale Baustein einer **Energiewende im Verkehr**. Sie ermöglicht, den Endenergiebedarf pro gefahrenem Kilometer stark zu verringern. Darüber hinaus kann durch die Elektromobilität erneuerbarer Strom auch ohne Umwandlung direkt genutzt werden. Für starke Minderungen der THG-Emissionen im Personenverkehr ist ein sehr schneller Markthochlauf von E-Pkw notwendig. Zur effizienten Erreichung der Klimaziele sollten ab 2040 nur noch E-Pkw neu zugelassen werden.
- ▶ Um Strom auch im Güterverkehr im Rahmen der **Energiewende im Verkehr** direkt nutzen zu können, sind für LNF und Lkw bis 12 t zGG, batterie-elektrische Antriebe schnell einzuführen. Für Lkw über 12 t zGG sowie Last- und Sattelzüge ist durch die Einführung von OH- bzw. bevOH-Lkw eine stärkere Reduzierung des Endenergieverbrauches und im Vergleich zum Einsatz von Plug-in-Hybriden möglich. Für die Einführung der OH-Technik ist die notwendige Infrastruktur schnellstmöglich entlang der stark befahrenen Autobahnabschnitte aufzubauen, damit ein ausreichend dichtes Netz für eine schnelle und starke Markteinführung der Lkw vorhanden ist.
- ▶ Neben der Elektromobilität ist der zweite wichtige Baustein für eine **Energiewende des Verkehrs** und damit die vollständige Dekarbonisierung des Verkehrs der Einsatz von erneuerbaren PtL-Kraftstoffen. Diese werden benötigt, da nicht alle Verkehrsmittel direkt bzw. alle Fahrzeuge vollständig elektrifiziert werden können. PtL-Kraftstoffe verursachen selbst in GreenSupreme im Jahr 2050 noch 50 % des Endenergieverbrauches im Verkehr (inkl. internationaler Verkehre). In den anderen Szenarien sind die erneuerbaren PtL Kraftstoffe zur Erreichung der THG-Neutralität im Jahr 2050 ebenso wichtig und werden in noch größeren Mengen benötigt. Dies zeigt, wie wichtig es ist, den Einsatz von erneuerbaren PtL Kraftstoffen im Verkehr rechtzeitig vorzubereiten, um den Markthochlauf in der Regel im Zeitraum nach 2030 sicher zu gewährleisten. PtL Kraftstoffe sind bevorzugt in internationalen Verkehren (See- und Luftverkehr) einzusetzen, unter anderem, da dort keine direkte Elektrifizierung als technische Alternative bis 2050 möglich ist<sup>100</sup>. Bei hohem Anstrengungsniveau zur schnellen Minderung der THG-Emissionen und zur schnellen Begrenzung der kumulierten THG-Emissionen kann es sinnvoll sein, auch schon im Jahr 2030 gewisse Mengen erneuerbaren PtL-Kraftstoffs in nationalen Verkehren zu nutzen. Damit dies eine sinnvolle Option ist, müssen jedoch die Verkehrswende und die Elektrifizierung parallel schnell vorangetrieben werden und auch außerhalb des Verkehrs Klimaschutz sehr ambitioniert verfolgt werden (siehe auch Kapitel 5.2.7). Die erneuerbaren PtL-Kraftstoffe ersetzen somit nicht die Elektromobilität, sondern ergänzen diese.

---

<sup>100</sup> Zur zukünftigen Energieversorgung des internationalen Schiffsverkehrs siehe 5.4.1.2 – PtL ist die in den Szenarien verwendete, aber nur eine von mehreren möglichen Optionen treibhausgasneutraler Kraftstoffe

- ▶ Die Geschwindigkeit des Hochlaufs der Elektromobilität entscheidet ganz wesentlich über den (Primär-)Rohstoffbedarf je Jahr. Dabei wäre es aufgrund der Kosten und Bereitstellungskapazitäten sinnvoll, einen gleichmäßigen Hochlauf über die Jahre anzustreben. Dies muss jedoch in Übereinstimmung mit dem übergeordneten Ziel möglichst geringer kumulierter THG-Emissionen geschehen, wonach ein möglichst schneller Hochlauf der Elektromobilität sinnvoll wäre. Aus beiden Maßgaben folgt, dass der Ausbau der Elektromobilität möglichst bald erfolgen muss und die ordnungs- und preispolitischen Rahmenbedingungen entsprechend gestaltet sein müssen.
- ▶ Das starke Verkehrswachstum des globalen Luftverkehrs erschwert die Dekarbonisierung erheblich. Effizienzgewinne können das Anwachsen des Energiebedarfs nur teilweise kompensieren, sodass der Kerosinbedarf und damit die THG-Emissionen weiter stark steigen, falls nicht zügig auf erneuerbare PtL-Kraftstoffe umgestellt wird. Selbst im sehr weitgehenden GreenSupreme-Szenario liegt die Verkehrsleistung 2050 nur wenig unter der von 2010. Erforderlich ist, die ökonomischen Vorteile des Luftverkehrs gegenüber anderen Langstreckenverkehrsmitteln abzubauen (z. B. Aufhebung der Kerosinsteuerbefreiung bzw. der Mehrwertsteuerbefreiung von internationalen Flügen, Abschaffung der Deckelung der Luftverkehrssteuer, Verschärfung des europäischen Emissionshandels für Luftverkehr) und die Erreichbarkeit aller deutschen Ballungszentren durch den Ausbau der Schienenstrecken deutlich zu verbessern (z. B. auf unter 4 Stunden), so dass innerdeutsches Fliegen möglichst schnell eingestellt werden kann. Zudem ist zeitnah eine internationale Einführungsstrategie für erneuerbares PtL zu implementieren.
- ▶ Den Endenergiebedarf der internationalen Verkehre mit erneuerbarem PtL zu decken, ist eine kosten-, ressourcen- und energieintensive Maßnahme. Deshalb gilt hier das Primat – mehr noch als bei anderen Verkehrsträgern – die Effizienzpotenziale weitergehend und schneller zu heben. Gemeint sind alle Kraftstoffbedarf mindernden Potenziale, sowohl technische am Flugzeug, als auch betriebliche wie beispielsweise im Flugroutenmanagement.
- ▶ Bei vollständiger Umstellung der internationalen Verkehre auf PtL Kraftstoffe wird es keine direkten THG-Emissionen mehr geben. Es werden allerdings Klimaeffekte aufgrund der Emissionen von Wasserdampf, Partikeln, NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub> bei Flugzeugen sowie von Black Carbon bei Schiffen in erheblichem Ausmaß bestehen bleiben, solange die Antriebstechnik nicht grundsätzlich auf verbrennungslose Alternativen umgestellt wird. Klimaneutral Fliegen mit heutiger Antriebstechnik ist nicht möglich, so dass auch Maßnahmen und Instrumente zur Vermeidung von Flügen stärker in den Blick genommen werden müssen.

## 5.5 Industrielle Produktion

### 5.5.1 Einleitung

Industrie und verarbeitendes Gewerbe sind wichtige Bestandteile unserer Gesellschaft. Entsprechend des technologischen Fortschritts, sich ändernder Bedürfnisse der Bevölkerung und Änderungen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind Industrie und verarbeitendes Gewerbe einem ständigen Wandel unterlegen. Im Fokus dieser Studie stehen die



Herausforderungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität Deutschlands als Industriestandort in der globalisierten Welt. Diese erfordert große Veränderungen in der Industrie, weil ohne die Umstellung relevanter Industrieprozesse der notwendige Klima- und Ressourcenschutz (siehe Kapitel 1 und 2) nicht zu erreichen ist.

In diesem Kapitel werden vertieft ausgewählte Branchen des verarbeitenden Gewerbes untersucht, also solche welche Rohstoffe und Zwischenprodukte maßgeblich weiterverarbeiten und dabei auch Endprodukte erzeugen. Hierbei werden auf verschiedene Arten Treibhausgasemissionen verursacht:

- ▶ Direkte (energiebedingte) Emissionen aus der Verwendung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe zur Bereitstellung von Energie (z. B. Prozesswärme, Dampf, mechanische Arbeit),
- ▶ Direkte (prozessbedingte) Emissionen aus der nicht-energetischen Verwendung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern und sonstigen Rohstoffen, oder aus der prozessbedingten Freisetzung anderer Treibhausgase als CO<sub>2</sub> sowie
- ▶ Indirekte energiebedingte Emissionen aus der vorgelagerten Erzeugung des verwendeten Stroms bzw. der verwendeten Wärme oder Kälte.

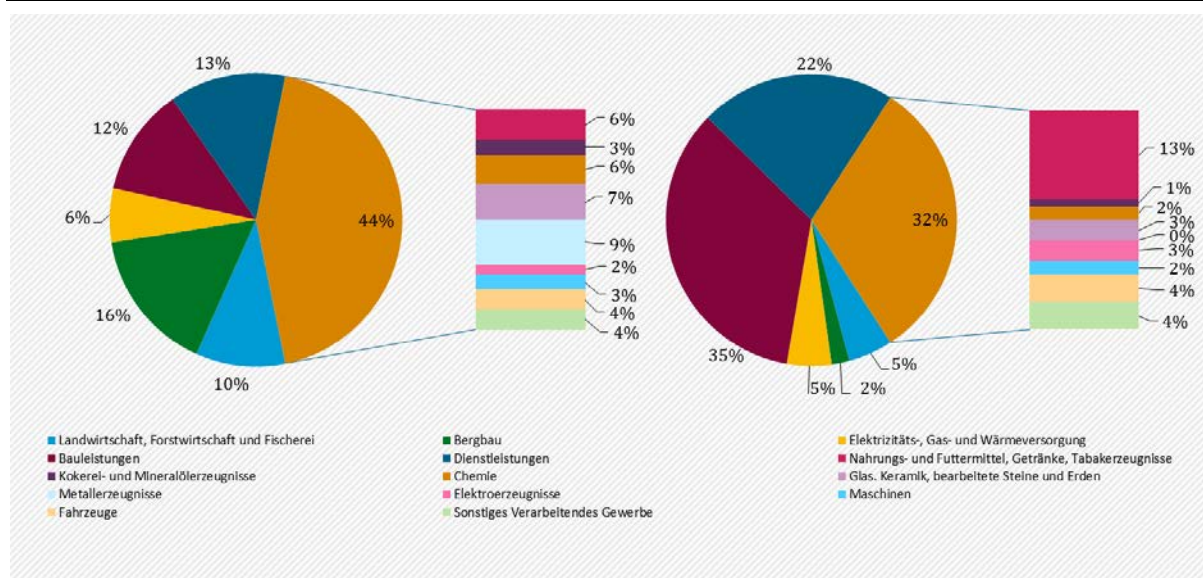
Die direkten Treibhausgasemissionen der deutschen Industrie betrugen 1990 283,8 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Bis zum Jahr 2016 konnten diese bereits auf 188,2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq reduziert werden und betrugen damit rund 20 % der berichterstattungspflichtigen Treibhausgasemissionen (BMU, 2019b).

Die Industriebranchen mit den größten (direkten) Treibhausgasemissionen sind die Eisen- und Stahlindustrie (einschließlich Kokereien und Walzwerken), die Zementindustrie, die Kalkindustrie, die chemische Industrie, die Glasindustrie, die Zellstoff- und Papierindustrie, die NE-Metallindustrie, die Keramikindustrie, die Nahrungsmittelindustrie sowie Gießereien. Darüber hinaus werden auch in anderen Bereichen des produzierenden Gewerbes durch die Strom- und Wärmebereitstellung sowie durch die Verwendung von Lösemitteln und fluorierten Gases erhebliche Treibhausgasemissionen verursacht.

Den größten Teil der industriellen Treibhausgasemissionen machen die direkten energiebedingten Emissionen aus. Die prozessbedingten Emissionen, beispielsweise aus Reduktionsprozessen, der Verwendung carbonathaltiger Rohstoffe oder von Lösemitteln und fluorierten Gasen, tragen mit etwa einem Drittel zu den direkten Emissionen bei.

Neben der Minderung von Treibhausgasemissionen ist die Inanspruchnahme von Rohstoffen ein wesentlicher Aspekt der Umstrukturierung der industriellen Branchen. Einhergehend mit der Herstellung von Gütern aus inländischer Produktion und aus Importen durchlaufen etwa 44 % der Primärrohstoffaufwendungen Betriebe des verarbeitenden Gewerbes, siehe Abbildung 5-75. Großen Anteil daran haben die Produktionsbereiche Metallverarbeitung, Fahrzeugproduktion und Maschinenbau, welche gemeinsam 16 % des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffdurchsatzes bedingen. Ebenfalls von sehr hoher Bedeutung sind die chemische Industrie mit 7 %, die Verarbeitung von Steinen und Erden sowie die Nahrungs- und Futtermittelindustrie mit jeweils 6 %. Dabei handelt es sich jedoch um eine Bruttogröße, welche Mehrfachzählungen enthält. Sofern der Output eines Produktionsbereichs nicht unmittelbar in die letzte Verwendung von Gütern eingeht, sondern als Vorleistung an nachfolgende Produktionsstufen weitergegeben wird, kommt es zu einer erneuten Zählung des Rohstoffrucksacks in der nachgelagerten Produktionsstufe (Dittrich et al., 2018). So lag der Rohstoffdurchsatz in RME in Deutschland 2010 mit 4.846 Mio. t, rund 82 % oberhalb des gesamtwirtschaftlichen Primärrohstoffeinsatzes RMI mit 2.667 Mio. t.

**Abbildung 5-75: Relativer Primärrohstoffdurchsatz nach Wirtschaftssectoren (links) und Relativer Rohstoffkonsum (RMC) nach bereitstellenden Wirtschaftssectoren (rechts) in 2010 in Deutschland**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2018)

Im Gegensatz zum Primärrohstoffdurchsatz betrachtet der inländische Primärrohstoffkonsum (RMC) die Endnachfrage nach Gütern, das heißt die Primärrohstoffnutzung für rein inländischen Konsum und Investitionen. Der Rohstoffkonsum für die Exporte, welche für das verarbeitende Gewerbe - insbesondere den Maschinenbau, die Metallverarbeitung, die Fahrzeugindustrie sowie die Chemische Industrie - von besonderer Bedeutung sind, werden dabei folglich nicht berücksichtigt. Der RMC betrug 2010 in Deutschland 1.390 Mio. t. Rund ein Drittel der Primärrohstoffaufwendungen für inländische Investitionen und Konsum werden durch Güter aus dem verarbeitenden Gewerbe verursacht. Hierbei hat die Nahrungs- und Futtermittelproduktion den größten Anteil (13 %), siehe Abbildung 5-75.

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Minderung der direkten Treibhausgasemissionen aus der Industrie. Die durch die nachfolgend beschriebenen technischen Prozess- und Produktionsänderungen resultierenden Rohstoffbedarfe sind allerdings in Kapitel 6.2 dargestellt.

Für die Minderung der direkten Treibhausgasemissionen aus der Industrie müssen je nach Branche, Ursache und Art der Emissionen und prozesstechnischen Herausforderungen unterschiedliche Ansätze zur Vermeidung und Minderung verfolgt werden. Ein grundlegender Ansatz zur Minderung der Emissionen ist, durch Steigerung der Materialeffizienz, Konsumverzicht oder die Substitution treibhausgasintensiver Produkte durch weniger treibhausgasintensive Produkte und Dienstleistungen den Bedarf an treibhausgasintensiven Industrieprodukten und damit mittelbar auch die Produktionsleistung der Industrie und die damit verbundenen THG-Emissionen zu mindern. Dieser Ansatz spiegelt sich in den abnehmenden Produktionsmengen in einzelnen Szenarien wider.

Für die direkten energiebedingten Emissionen gibt es folgende grundsätzliche Ansätze zur Minderung der THG-Emissionen:

- Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung von energieeffizienten Techniken, Optimierung von Verfahren und Prozessen sowie eine konsequente Abwärmenutzung sowie

- Umstellung auf weniger treibhausgasintensive und erneuerbare Energieträger, und wo technisch möglich auf die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom.

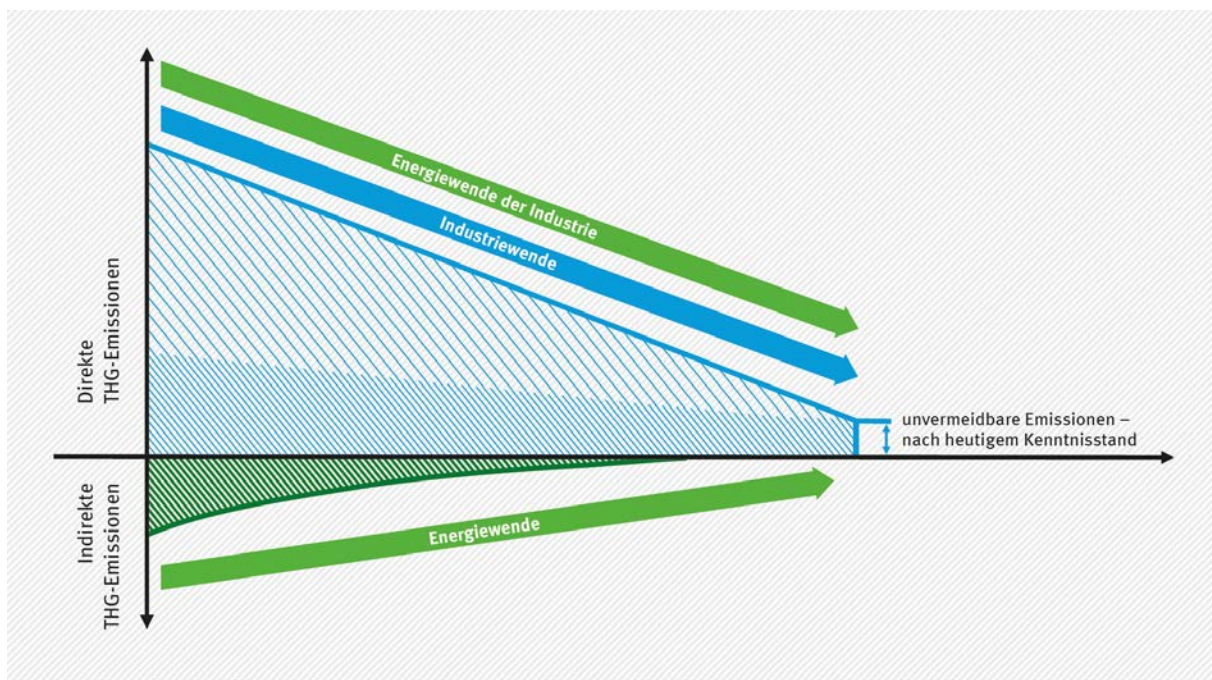
Letzteres kann für Prozessfeuerungen bereits eine große Herausforderung darstellen. Noch schwieriger ist die Minderung der direkten prozessbedingten Emissionen, denn hierzu gibt es zwar auch verschiedene Ansatzpunkte, die aber von Branche zu Branche sowie von Produkt zu Produkt unterschiedlich gut umsetzbar sind:

- Vermeiden von Materialien oder Produkten, deren Herstellung mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden ist, oder deren Substitution durch weniger treibhausgasintensive Materialien und Produkte sowie
- Vermeiden der rohstoffbedingten bzw. prozessbedingten Emissionen durch grundlegende Verfahrensumstellungen oder die Substitution von Rohstoffen.

Die indirekten energiebedingten Treibhausgasemissionen können durch eine Verbesserung der Energieeffizienz der Energietechniken anteilig gemindert werden. Die wesentliche Minderung muss jedoch in der Energiewirtschaft durch die Umstellung auf erneuerbare Energien erfolgen. Dieser Teil der Minderung wird im Folgenden nicht betrachtet, weil dies bereits Gegenstand von Kapitel 5.2 ist. Wie dort dargestellt, müssen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Sektoren berücksichtigt werden. So ist zur Minderung der prozessbedingten Emissionen durch neue Verfahren oder Rohstoffe eine ausreichende Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom oder den daraus erzeugten Energieträgern (z. B. regenerativer Wasserstoff oder Methan) zu gewährleisten, anderenfalls würde die Umstellung der Industrieprozesse erstmal nicht zu einer Minderung, sondern nur zu einer Verlagerung von THG-Emissionen führen. Die Umgestaltung der Industrieprozesse muss also Hand in Hand mit der Energiewende gehen, um über den gesamten Transformationspfad eine effektive Treibhausgasreduzierung zu erreichen.

Abbildung 5-76 veranschaulicht rein qualitativ die Entwicklung der direkten und indirekten THG-Emissionen auf dem Weg zu einer weitgehend treibhausgasneutralen Industrie. Durch die Energiewende konvergieren die indirekten Emissionen gegen Null, parallel sorgt die „Energiewende in der Industrie“ dafür, dass auch die direkten energiebedingten Emissionen gegen Null gehen, und mit der sogenannten Dekarbonisierung der Industrieprozesse („Industriewende“) werden die direkten prozessbedingten Emissionen auf das nach heutigem Kenntnisstand unvermeidbare Niveau reduziert.

**Abbildung 5-76: Qualitative Darstellung der Minderung von industriell verursachten Treibhausgasemissionen**



Quelle: eigene Darstellung

Grundlage der Green-Szenarien für den Industriebereich sind die in der UBA-Studie (UBA, 2014c) entwickelten branchenspezifischen Annahmen, welche nach aktuellem Kenntnisstand weiterentwickelt und um Annahmen für die Zwischenjahre 2030 und 2040 ergänzt wurden. Unter den systemischen Prämissen, dass in allen Green-Szenarien eine Treibhausgasreduzierung um mindestens -95 % erreicht werden soll, auf die energetische Nutzung von angebauter Biomasse sowie auf CCS verzichtet werden soll, waren die Variationsmöglichkeiten zur THG-Minderung in der Industrie in den Green-Szenarien begrenzt.

Charakteristisch für das GreenEe1-Szenario im Industriebereich ist, dass in der Regel von konstant bleibenden Produktionsmengen ausgegangen wird, und die Treibhausgasreduzierung maßgeblich durch eine gesteigerte Energieeffizienz, durch grundlegende Verfahrensumstellungen sowie durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger, wo technisch möglich auf direkte Nutzung von erneuerbarem Strom, erreicht wird. GreenLate übernimmt in Bezug auf 2050 viele dieser Annahmen, allerdings erfolgt die Umsetzung erst verzögert. So wird mit der Erneuerung des Anlagenparks hin zu treibhausgasintensiven Techniken im Wesentlichen erst nach 2040 begonnen und die Potentiale zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz nur teilweise ausgeschöpft. Nur Branchen mit Prozesstechniken, die kurze Erneuerungszyklen aufweisen, können bis 2050 noch auf direkt strombasierte und damit systemische effiziente Endenergieträger umstellen. Vor dem Hintergrund verzögerter Umstrukturierungen verbleibende Brennstoffbedarfe, welche durch regenerative Brennstoffe gedeckt werden müssen, was gesamtwirtschaftlich zu einem höheren Energieverbrauch führt, siehe Kapitel 5.2.4.

Im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate wurden für die weiteren Szenarien keine konstanten Produktionsmengen angenommen, sondern die Produktionsmengen modellendogen ermittelt (siehe Kapitel 4). So führen Annahmen in den anderen Handlungsfeldern, z. B. bei Bauen und Wohnen oder Mobilität, für viele Materialien zu einem sinkenden Bedarf. Würde in diesem Fall die Produktionsmenge konstant bleiben, müssten die Exporte deutlich ansteigen, was unter der



Grundannahme einer parallelen Entwicklung außerhalb Deutschlands nicht plausibel erscheint. Folglich ergibt sich für die Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme bei den meisten industriell erzeugten Grundstoffen bis 2050 eine abnehmende Produktionsmenge. Beim GreenMe-Szenario wird diese Entwicklung maßgeblich durch besondere Anstrengungen zur Verbesserung der Materialeffizienz erreicht. In GreenLife wirken ergänzend Änderungen hin zu mehr nachhaltigeren Konsum und reparaturfähiger Produkte, die zu einer geringeren Nachfrage an industriellen Produkten führen. Das Szenario GreenSupreme zeigt den ambitioniertesten Transformationspfad auf. Hier werden alle Annahmen aus den anderen Szenarien in Hinblick auf einen möglichst weitgehenden Klima- und Ressourcenschutz miteinander kombiniert. Des Weiteren wird, um die kumulierten Emissionen zu reduzieren, bereits 2040 auf die Nutzung von Kohle in sämtlichen Anwendungen (z. B. zur Prozesswärmeversorgung) verzichtet.

In Tabelle 5-26 sind die charakteristischen Unterschiede der Green-Szenarien für die Industrieproduktion im Überblick dargestellt.

**Tabelle 5-26: Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Industrie**

	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Ausstieg aus der Kohlenutzung	bis 2050					bis 2040
Heben der Energieeffizienzpotentiale	sehr hoch	mittel	sehr hoch			
Materialeffizienz der eingesetzten Techniken	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
Einbettung in den internationalen Handel	Exportüberschuss		ausgeglichener Handel			
Produktionsmengen	konservative Annahme, i.d.R. konstant		modell-endogen ermittelt, was je nach Annahmen für nachfrageseitige Änderungen zu mehr oder weniger stark abnehmenden Produktionsmengen führt			
Endenergiebedarfe	niedrig	hoch	niedrig		sehr niedrig	

### 5.5.2 Eisen- und Stahlerzeugung

Die Eisen- und Stahlerzeugung ist, ungeachtet des industriellen Strukturwandels im 20. Jahrhundert, immer noch einer der wichtigsten Industriezweige in Deutschland. Mit ihrer breiten Produktpalette von etwa 2000 Stahlsorten liefert sie zudem eine wichtige materielle Grundlage für viele andere Industriezweige.

Die gesamte Stahlproduktion bewegt sich seit Ende der 90er Jahre auf einem annähernd konstanten Niveau von 45 Mio. t pro Jahr, wovon etwa 30 % in Elektrostahlwerken auf der Basis von Schrott erzeugt werden, der Rest auf Basis von Eisenerz über die Hochofen-Oxygenstahlwerk-Route (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019). 85 % des erzeugten Rohstahls wird anschließend in den Warmwalzwerken der deutschen Stahlwerke zu Walzstahlprodukten (z. B. Bleche, Stahlträger, Schienen, Stahldraht) weiterverarbeitet.

Aufgrund der hohen Produktionsmengen sowie auch des hohen spezifischen Bedarfs an Energieträgern gehört die Stahlindustrie in Deutschland zu den energieintensivsten Industriezweigen. Zugleich ist die Stahlindustrie mit etwa 56 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr

(Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019) für etwa 30 % der direkten THG-Emissionen des Industriesektors verantwortlich. Der größte Teil davon resultiert aus dem Einsatz von Koks im Hochofen, der dort sowohl als Reduktionsmittel als auch als „Stützgerüst“ benötigt wird, und daher im Hochofenprozess allenfalls anteilig durch andere, weniger THG-intensive Reduktionsmittel ersetzt werden kann.

Die Elektrostahlerzeugung verursacht deutlich niedrigere THG-Emissionen, weil hier keine Reduktionsmittel benötigt werden und das Einschmelzen des Schrotts zum großen Teil durch den Einsatz von Strom erfolgt. Der Anteil der Sekundärstahlerzeugung über die Elektrostahlwerksroute lässt sich jedoch nur in dem Umfang erhöhen, wie geeignete Schrotte verfügbar sind. Aktuell beträgt das Schrottaufkommen in Deutschland etwa 45 % der Rohstahlproduktion (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019), wovon aber ein Teil von den Oxygenstahlwerken als „Kühlschrott“ benötigt wird. Langfristig wird sich das Schrottaufkommen sicher erhöhen, aber auf absehbare Zeit wird es nicht ausreichen, um auf eine Stahlerzeugung auf Basis primärer Rohstoffe (Eisenerz) vollständig verzichten zu können.

Neben den aus dem Einsatz von Brennstoffen (auch in der Funktion als Reduktionsmittel) resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen in der Stahlindustrie in geringem Umfang auch rohstoffbedingte Emissionen, namentlich durch den Einsatz von Kalkstein in den Sinteranlagen und Hochöfen, durch den Abbrand der Graphitelektroden sowie durch die Kohlenstaubeinblasung zur Schaumslagenerzeugung in den Elektrolichtbogenöfen.

#### 5.5.2.1 Entwicklung der Stahlindustrie in den Green-Szenarien

Für eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen aus der Eisen- und Stahlerzeugung bietet die Sekundärstahlerzeugung über die Elektroofenroute die günstigsten Voraussetzungen, weil hier der Endenergiebedarf vollständig durch Strom gedeckt werden kann (auch wenn bisher ein Teil des Energieeintrags über die Zufeuerung mit Erdgas erfolgt). Es wird daher in allen Green-Szenarien angenommen, dass sich die Menge des auf Basis von Schrott erzeugten Elektrostahls bis 2050 in dem Umfang zunimmt, in dem sich die verfügbare Schrottmenge erhöht, und der Energiebedarf für die Elektrostahlproduktion bis 2050 zu 100 % durch erneuerbaren Strom gedeckt wird. Konkret wird in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife die sehr optimistische Annahme getroffen, dass das Schrottaufkommen von aktuell 45 % der Rohstahlproduktion bis 2050 auf 67 % ansteigt (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019). In GreenLate wird nur ein Anstieg auf 50 % unterstellt. Vor dem Hintergrund, dass in GreenSupreme die Umstrukturierung ambitionierter erfolgt, wird bereits im Jahr 2040 ein Anteil von 67 % angenommen.

Bei der Elektrostahlerzeugung verbleiben in 2050 durch die vollständige Nutzung von erneuerbarem Strom allenfalls noch die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand, sofern es nicht möglich sein sollte, die Elektroden dann auch auf Basis von erneuerbarem Kohlenstoff herzustellen. Auf die Kohlenstaubeinblasung zur Schaumslagenerzeugung, für die bisher ebenfalls keine treibhausgasneutrale Alternative bekannt ist, wird in allen Szenarien nach und nach verzichtet (in GreenLate allerdings nur zur Hälfte). Dadurch sinken die rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen, gleichzeitig verschlechtert sich dadurch jedoch auch die Energieeffizienz des Lichtbogenofens.<sup>101</sup>

Weiterhin wird in allen Green-Szenarien angenommen, dass in Deutschland neben der Elektrostahlerzeugung auf der Basis von Schrott weiterhin eine Eisen- und Stahlerzeugung auf Basis primärer Rohstoffe (Eisenerz) erfolgt, um den angenommenen Gesamtbedarf an Rohstahl

<sup>101</sup> Vor dem Hintergrund hoher Energiepreise wäre auch für GreenLate denkbar, dass die Kohlenstaubeinblasung zur Schaumslagenerzeugung weiter betrieben wird, um die Energiekosten zu minimieren. Dies würde zu höheren Restemissionen an CO<sub>2</sub> führen, so dass diese Option in den vorliegenden Szenarien nicht betrachtet wurde.

(siehe Abbildung 5-77) zu decken. Da bei der Roheisenerzeugung in Hochöfen verfahrensbedingt die aus dem Einsatz von Koks resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht vermieden werden können, ist es zur Erfüllung der Klimaschutzziele unvermeidlich, die Primärstahlerzeugung langfristig von der Hochofen-Oxygenstahlwerk-Route auf andere, deutlich weniger treibhausgasintensive Produktionsverfahren umzustellen. Dazu kommen nach heutigem Kenntnisstand zwei Verfahrensrouten in Betracht:

- ▶ gasbasierte Direktreduktionsverfahren unter Verwendung von Wasserstoff, der mit Hilfe von erneuerbarem Strom erzeugt wurde oder
- ▶ elektrolytische Verfahren zur Eisengewinnung unter direkter Verwendung von erneuerbarem Strom

Die in Teilen der Stahlindustrie und Wissenschaft diskutierte Option, dass im Hochofen und Oxygenstahlkonverter entstehende CO und CO<sub>2</sub> abzuscheiden und wieder in kohlenstoffhaltige Grundchemikalien oder Energieträger umzuwandeln („Carbon Capture and Utilisation“ – CCU), ist aus unserer Sicht nicht zielführend. Durch den weiteren Einsatz von fossilem Kohlenstoff würde die Emission von fossilem CO<sub>2</sub> nicht tatsächlich vermieden, sondern lediglich der Kohlenstoff einer weiteren Nutzung zugeführt, bevor er als fossiles CO<sub>2</sub> in die Umwelt abgegeben wird. Aufgrund des hohen Energiebedarfs für die Umwandlung von CO<sub>2</sub> ist es sowohl energetisch als auch in Bezug auf den Klimaschutz effizienter, die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eins der vorgenannten Verfahren zu vermeiden. Anderenfalls würden sich die Gesamtemissionen an CO<sub>2</sub> durch CCU sogar erhöhen, weil die Erzeugung der benötigten Energie auf absehbare Zeit noch mehr CO<sub>2</sub> verursacht als durch den zusätzlichen Nutzungszyklus des Kohlenstoffs an fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden kann, siehe Kapitel 5.2.1.1.1.

Die elektrolytischen Verfahren zur Eisenreduktion befinden sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium und werden daher in den betrachteten Szenarien nicht berücksichtigt. Gasbasierte Direktreduktionsverfahren werden hingegen bereits weltweit im industriellen Maßstab betrieben. Bisher wird dabei in der Regel Erdgas eingesetzt, um das Stückerz oder Eisenerz-Pellets bei Temperaturen unterhalb des Schmelzpunkts zum sogenannten Schwammeisen (engl. DRI für „direct reduced iron“) zu reduzieren, welches anschließend üblicherweise zusammen mit Schrott im Elektrolichtbogenofen zu Stahl weiterverarbeitet wird. Es wird in allen betrachteten Szenarien außer GreenLate angenommen, dass die benötigte Menge an Stahl aus primären Rohstoffen ab 2030 zunehmend, bis 2050 vollständig durch eine Kombination aus mit Wasserstoff betriebenen Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen erzeugt wird. In GreenSupreme erfolgt der Technologieumbau bereits im Zeitraum von 2025 bis 2040. Auch in GreenLate wird ein vollständiger Prozesswechsel angenommen, allerdings wird angenommen, dass in den DRI-Anlagen 2030 noch 75 % und 2050 noch 25 % Erdgas bzw. erneuerbares strombasiertes Gas eingesetzt werden. Es wird weiterhin unterstellt, dass in GreenLate erneuerbares Gas aus der allgemeinen Gasversorgung bezogen wird und damit im Wesentlichen importiert wird, siehe Kapitel 5.2.4. Hingegen wird in den anderen Szenarien unterstellt, dass die Produktion von Wasserstoff am Standort bzw. standortnah<sup>102</sup> erfolgt, also in Deutschland. Dementsprechend wird der hierfür erforderliche Strombedarf für die Elektrolyse<sup>103</sup> zur Wasserstofferzeugung der Stahlproduktion zu geordnet. Der Strombedarf für erneuerbares Gas aus der allgemeinen Gasversorgung jedoch nicht, da dessen Erzeugung nicht unmittelbar an die Stahlproduktion gekoppelt ist.

---

<sup>102</sup> Versorgung über kleine dezentrale industriell genutzte Wasserstoffnetze, wie sie bereits heute bspw. im Ruhrgebiet existieren.

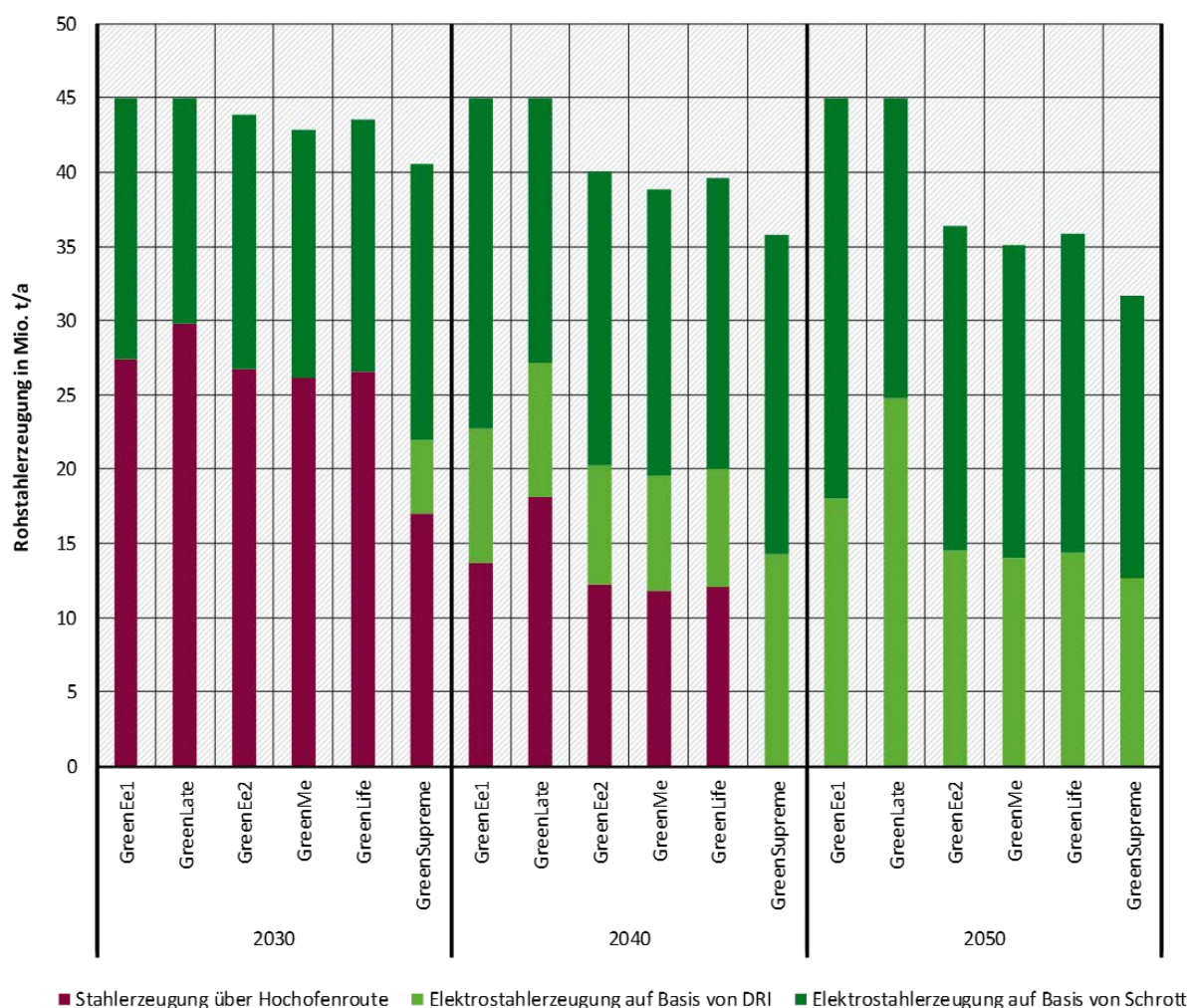
<sup>103</sup> Und Peripherie.

Hinsichtlich der Energieeffizienz wird in allen Green-Szenarien eine Verbesserung bis 2050 um 20 % angenommen (in GreenLate nur 10 %; in GreenSupreme schon bis 2040). Gleichzeitig gibt es jedoch einen Mehrbedarf an Strom aufgrund des Verzichts auf die Schaumslaggeerzeugung (in GreenSupreme schon bis 2040) sowie auf die Zufeuerung mit Erdgas (in GreenLate nur zu 50 %). Für die Warmwalzwerke wird eine Effizienzsteigerung um 60 % angenommen (in GreenLate nur um 40 %), zudem erfolgt eine vollständige Umstellung vom Energieträger Gas auf eine induktive Erwärmung des Walzguts mittels Strom (in GreenLate wiederum nur zu 50 %).

Hinsichtlich der Produktionsentwicklung, wird für GreenEe1 und GreenLate eine konstante Rohstahlproduktion bis 2050 bei 45 Mio. t pro Jahr unterstellt. Für die weiteren Szenarien wurden die Produktionsmengen modellendogen auf Basis der sich ändernden Nachfrage nach Stahl ermittelt. Unter der Annahme, dass keine Verlagerung von Nachfragen ins Ausland über die heutigen anteiligen Verhältnisse hinaus erfolgt, führen die angenommen nachfrageseitigen Änderungen in den Handlungsfeldern Energieversorgung, Bauen und Wohnen sowie Mobilität zu einem Rückgang der Rohstahlerzeugung in Deutschland je nach Szenario auf 32 bis 37 Mio. t in 2050. Würde auch in diesen Szenarien von einer konstanten Rohstahlproduktion von 45 Mio. t ausgegangen, müssten sich die Exporte drastisch erhöhen, was bei Annahme einer parallelen Entwicklung im Rest der Welt nicht plausibel wäre.

Die aus den Annahmen resultierenden Produktionsmengen sowie die Aufteilung auf die einzelnen Produktionsrouten sind in Abbildung 5-77 veranschaulicht. Während sich der Anteil der schrottbasierten Elektrostahlerzeugung in allen Szenarien bis 2050 auf etwa 60 % erhöht, wird die Stahlerzeugung über die Hochofenroute zwischen 2030 bis 2050 und bei GreenSupreme schon 2040 vollständig durch eine Stahlerzeugung auf Basis von mit Wasserstoff direkt reduziertem Eisen (DRI) ersetzt. Die dazu benötigte Anlagenkapazität an DRI-basierter Stahlproduktion liegt je nach Szenario zwischen 13 und 18 Mio. t pro Jahr.



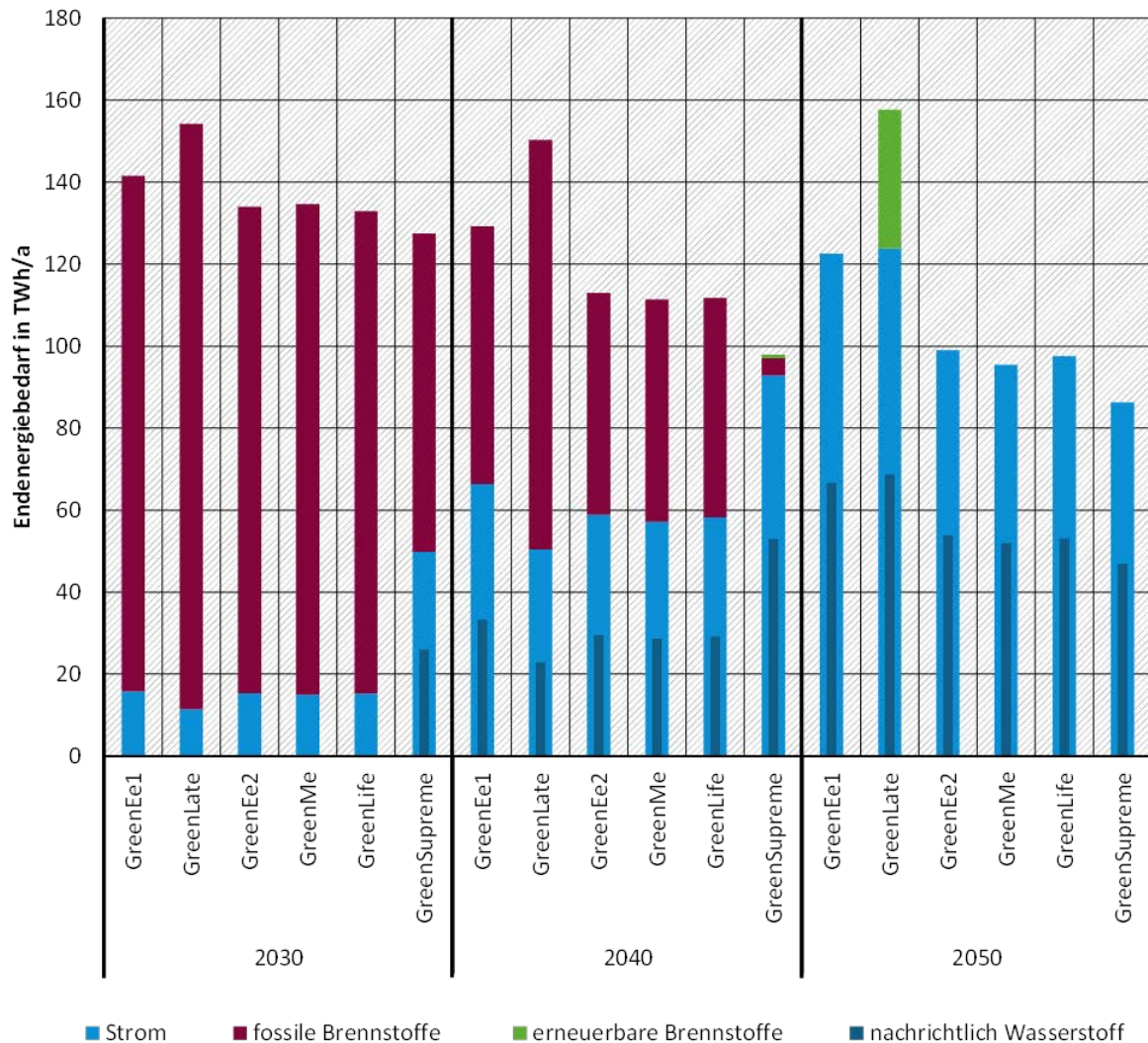
**Abbildung 5-77: Entwicklung der Rohstahlproduktion und der Anteile der einzelnen Produktionsrouten in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die hieraus und aus den Annahmen zur Energieeffizienz resultierenden Bedarfe an Endenergie in der Branche sind in Abbildung 5-78 zu sehen. In allen Szenarien außer GreenLate nimmt der Endenergiebedarf durch Effizienzgewinne in Verbindung mit der Umstellung auf Strom bis 2050 deutlich ab. Gleichzeitig vervielfacht sich der Strombedarf in GreenSupreme auf 86 TWh/a (hier schon bis 2040), in GreenEe2, GreenMe und GreenLife auf knapp 100 TWh/a und in GreenEe1 und GreenLate sogar auf über 120 TWh pro Jahr. In Abbildung 5-78 ist zusätzlich der Endenergiebedarf an Wasserstoff dargestellt.

Im GreenLate-Szenario nimmt der Endenergiebedarf von 2030 bis 2050 nicht ab, weil Energieeffizienzpotentiale nur teilweise gehoben werden, was durch den Verzicht auf die Schaumslagenerzeugung wieder nivelliert wird, und die Umstellung auf strombasierte Prozesse erst verspätet und nicht vollständig erfolgt. Deswegen gibt es hier in 2050 im Gegensatz zu den anderen Szenarien einen relevanten Bedarf an erneuerbaren Brennstoffen in Höhe von 34 TWh/a.<sup>104</sup>

<sup>104</sup> Die hierfür benötigte Menge an Strom spiegelt sich nicht in dem hier dargestellten Strombedarf wider, da deren Produktion nicht unmittelbar mit der Stahlproduktion gekoppelt ist. Vielmehr ist diese in der Nettostromerzeugung für die Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung in Kapitel 5.2.4 erfasst.

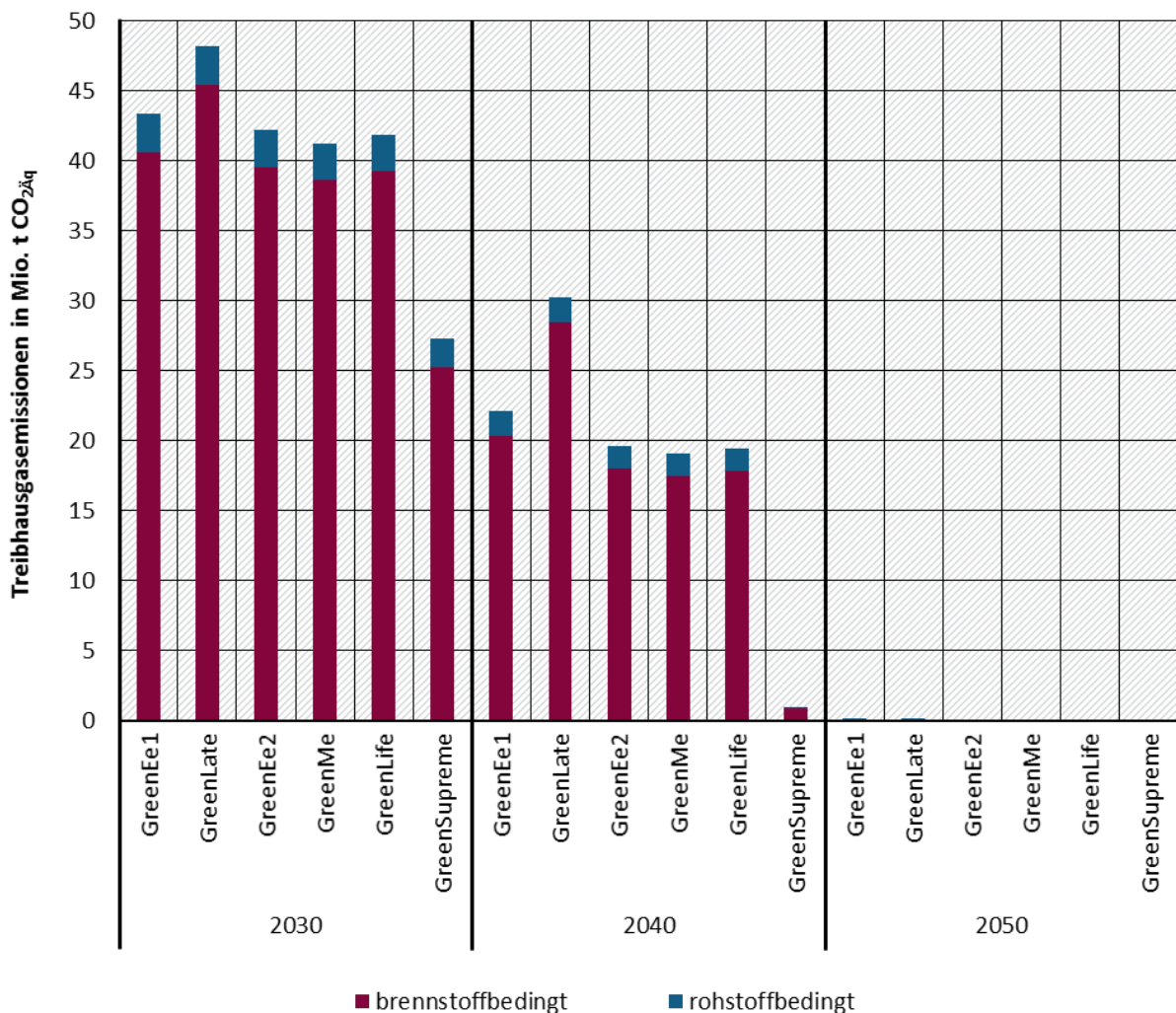
**Abbildung 5-78: Entwicklung der Endenergiebedarfe der Stahlindustrie und der Anteile der eingesetzten Energieträger in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Durch die vollständige Umstellung der Stahlindustrie auf klimaschonende Prozesse und erneuerbare Energien werden die brennstoffbedingten Treibhausgasemissionen in allen Szenarien bis 2050 vollständig vermieden, in GreenSupreme sogar schon weitgehend bis 2040, siehe Abbildung 5-79.

Die rohstoffbedingten Emissionen werden in allen Szenarien bis 2050 auch sehr weitgehend reduziert, in GreenSupreme wiederum schon bis 2040. Es verbleiben in allen Szenarien nur noch die ebenfalls deutlich geminderten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Elektrodenabbbrand (zwischen 114 und 162 kt CO<sub>2</sub>Äq).



**Abbildung 5-79: Entwicklung der brennstoff- und der rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen der Stahlindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.2.2 Schlussfolgerung

Damit die Stahlindustrie einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten kann, muss neben der Umstellung auf erneuerbare Energieträger, insbesondere Strom, bis 2050 ein weitgehender Umbau des bestehenden Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren erfolgen. Zur Begrenzung des Investitionsbedarfs sollte dieser Umbau nach und nach entsprechend der üblichen Erneuerungszyklen der Anlagen erfolgen, d. h. für Kernkomponenten wie den Hochofen bereits spätestens ab 2030. Das setzt aber voraus, dass bis dahin

- ▶ wertschöpfungsnahe anwendungsreif sind, vor allem effizientere Verfahren zur strombasierten Wasserstofferzeugung, die wasserstoffbasierte Direktreduktion, ggf. elektrolytische Verfahren zur Eisengewinnung, ggf. neue Verfahren zur Weiterverarbeitung des auf diese Weise erzeugten Eisens bzw. Stahls, zur CO<sub>2</sub>-freien Prozesswärmeerzeugung und zur Verwertung der anfallenden Reststoffe,
- ▶ die Umstrukturierung der Energieversorgung so schnell voranschreitet, dass erneuerbarer Strom und daraus gewonnener Wasserstoff ggf. auch Methan bereits am 2030 in dem

benötigten großen Umfang für die erforderliche Umstellung der Stahlindustrie zur Verfügung stehen sowie

- ▶ die politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Stahlindustrie so gestaltet werden, dass sowohl der Umbau des Anlagenparks auf die neuen, treibhausgasarmen Produktionsrouten wirtschaftlich darstellbar, als auch deren Betrieb konkurrenzfähig zu den in der Übergangszeit noch parallel betriebenen konventionellen Anlagen ist.

### **5.5.3 NE-Metallindustrie**

Nichteisenmetalle (NE-Metalle) sind unverzichtbar für die Wirtschaft hochtechnisierter Industrieländer. Sie werden vielfältig genutzt, bspw. im Bereich der Elektronik- und Elektrotechnik, dem Maschinen- und Fahrzeugbau sowie im Bausektor. Die NE-Metallbranche zählt zu den energie- und rohstoffintensivsten Branchen weltweit.

In Deutschland umfasst die Branche vorrangig die Produktion, die erste Bearbeitung sowie das Gießen der Massenmetalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink sowie von Edelmetallen. Im Kontext stehen vorgelagerte Prozesse zur Aufbereitung von Erzen wie bspw. zur Herstellung von Aluminiumoxid. NE-Metalle können grundsätzlich gut recycelt werden, wobei das Recycling deutlich weniger Energie benötigt als die Primärherstellung. Beispielsweise wird beim Kupferrecycling nur 36 % der Energie des Primärprozesses benötigt, beim Aluminiumrecycling sogar nur 5 % (UBA, 2014c). Besonders stromintensiv ist vor allem die Primäraluminiumindustrie mit einem Verbrauch von ca. 14 MWh pro Tonne erzeugtem Aluminium. Aber auch für die Elektrolyse von Kupfer und Zink werden große Mengen elektrische Energie benötigt. Prozessbedingte Treibhausgasmissionen entstehen bei der Primäraluminiumindustrie durch den Einsatz von Kohlenstoffanoden. In den übrigen Teilbranchen entsteht CO<sub>2</sub> durch den Einsatz kohlenstoffhaltiger Reduktionsmittel sowie aus dem Einsatz von Erzen und mit organischen Stoffen kontaminierten Recyclaten.

#### **5.5.3.1 Entwicklung der NE-Metallindustrie in den Green-Szenarien**

Zur Minderung von Treibhausgasemissionen stehen aus heutiger Sicht in der NE-Metallindustrie folgende Maßnahmen zur Verfügung:

- ▶ Steigerung und Optimierung des Schrottrecyclings,
- ▶ Erhöhung der Energieeffizienz, und
- ▶ Minderung und Vermeidung von prozessbedingten Treibhausgasemissionen.

Dabei kann die Energieeffizienz gesteigert werden durch:

- ▶ Reduzierung des Energieverbrauchs beim Schmelzen,
- ▶ Restwärme- bzw. Abwärmenutzung sowie
- ▶ flächendeckende Etablierung von Energiemanagementsystemen.

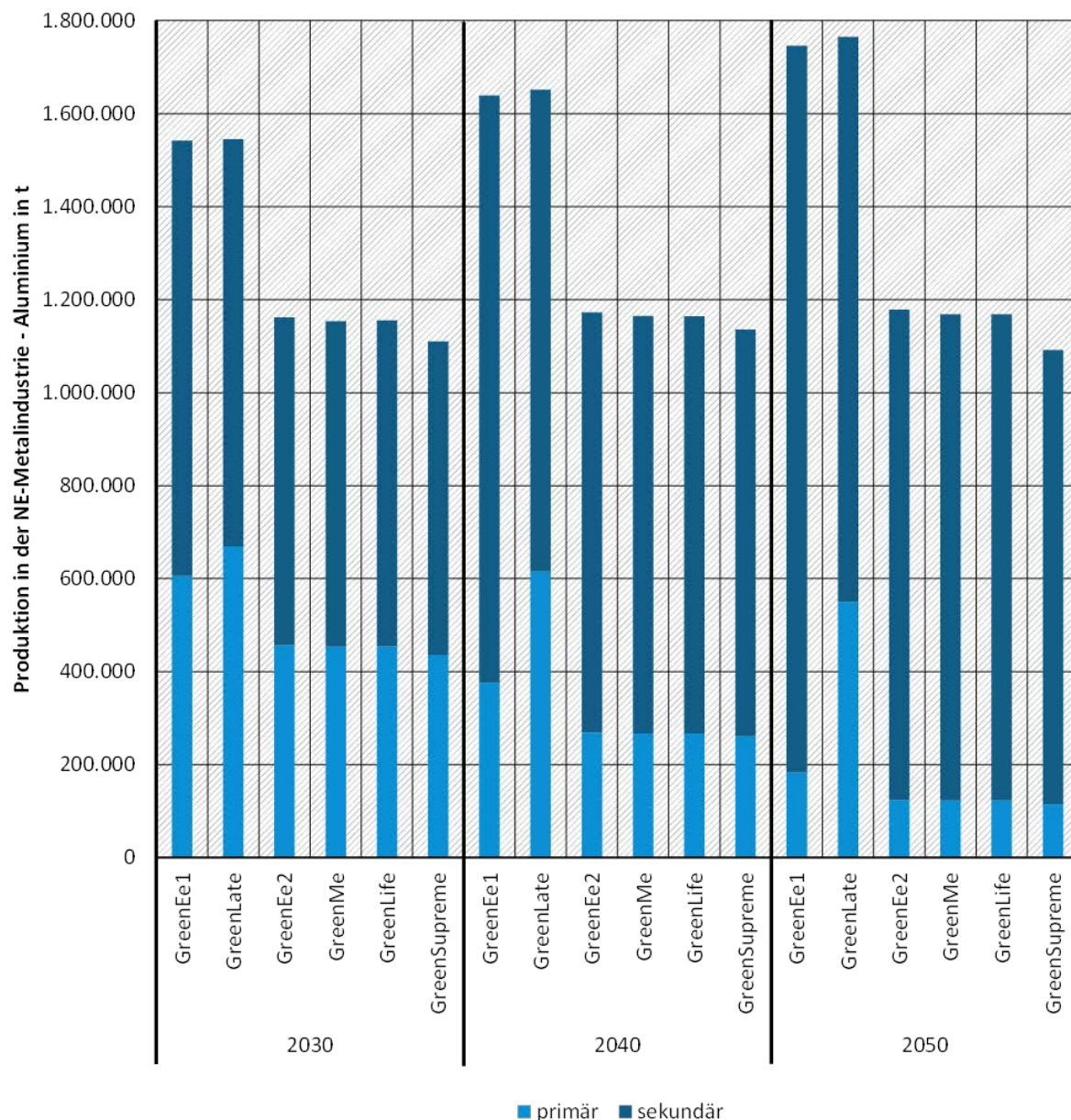
Die energiebedingten Treibhausgasemissionen können durch Substitution der fossilen brennstoffbefeuerten Öfen durch elektrische Schmelzöfen und den Einsatz von erneuerbarem Strom vollständig gemindert werden. Die prozessbedingten Treibhausgasemissionen können gemindert werden durch:



- ▶ den Einsatz von regenerativ erzeugten Reduktionsmitteln sowie
- ▶ den Einsatz von inerten Anoden in der Primäraluminiumindustrie.

Diese Maßnahmen wurden bereits in der UBA- Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c) dargestellt und werden nun im Wesentlichen für die Green-Szenarien übernommen.

Die größten Treibhausgasminderungen ergeben sich durch die Steigerung des Schrottrecyclings bzw. der Sekundärproduktion an der Gesamtproduktion. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme ergibt sich im Vergleich zum Basisjahr 2010 (56 %) ein Anstieg der Sekundärproduktion auf 90 % im Jahr 2050 (Anstieg 2030-2040-2050: 62 %-78 %-90 %). Im Szenario GreenLate wird hingegen ein linearer Anstieg des Sekundäranteils auf nur 70 % angenommen. Bis 2050 wird in den Szenarien GreenEe1 und GreenLate ein jährlicher Anstieg der Gesamtproduktionsmengen um 0,7 % unterstellt. Wie in Abbildung 5-80 erkenntlich liegt die Produktion dadurch um etwa ein Viertel über den anderen Szenarien. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife bleiben die modellendogen ermittelten Produktionsmengen hingegen relativ konstant, während sie im Szenario GreenSupreme leicht sinkt. Abbildung 5-80 veranschaulicht die oben genannten Annahmen hinsichtlich der verschiedenen Szenarien am Beispiel der Aluminiumindustrie.

**Abbildung 5-80: Entwicklung der Produktionszahlen in der Aluminiumindustrie in den Green-Szenarien**

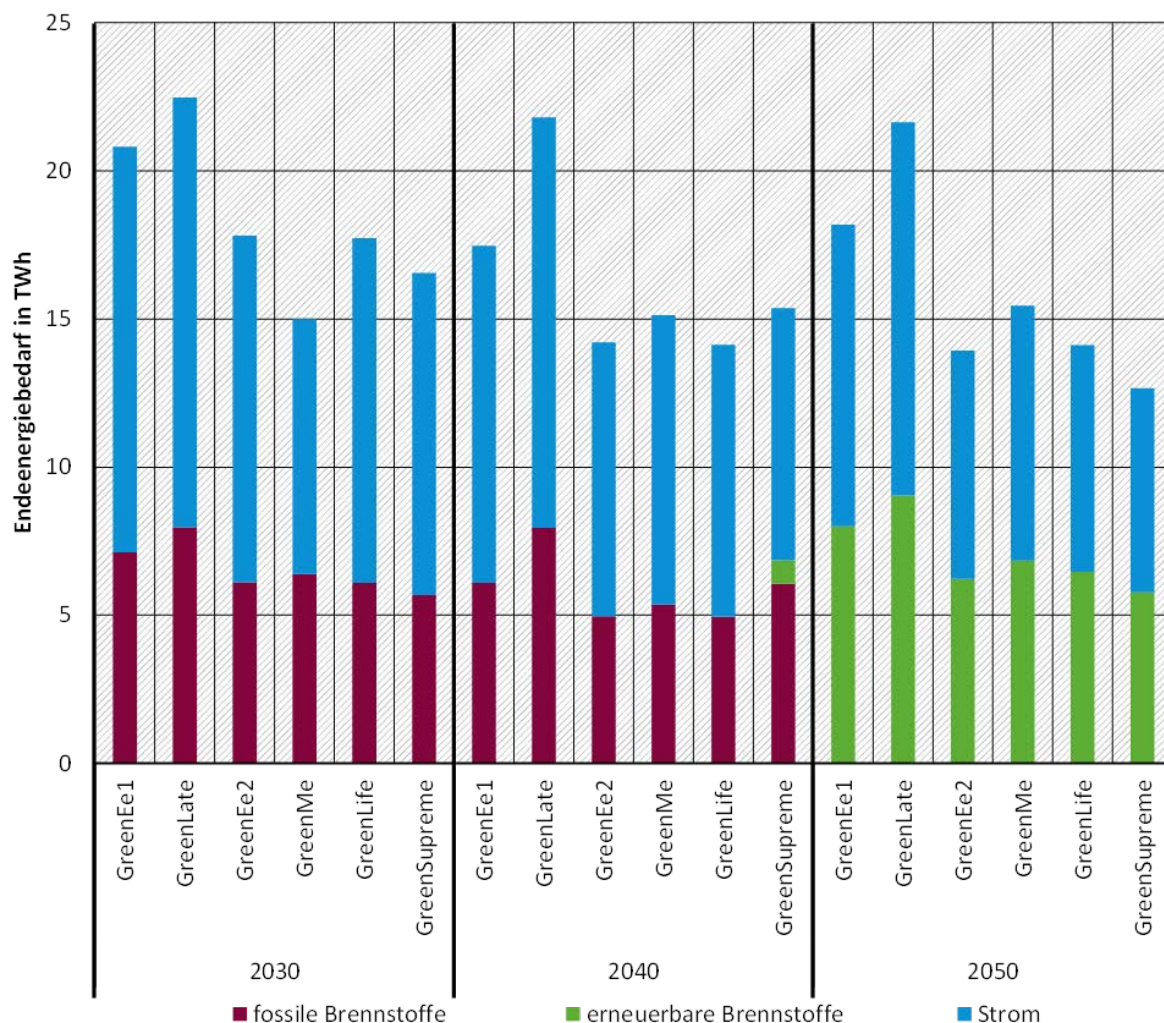
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Der technologische Umbau der Branche basiert weitestgehend auf der Umstellung gasbefuerter Schmelzöfen auf strombetriebene Induktionsöfen. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wird für die Zeit von 2030 bis 2050 eine lineare Erhöhung des Stromanteils auf 65 % für die Herstellung von Sekundärmetall und Halbzeugen angenommen. Der Stromanteil bei der Herstellung der Primärmetalle bleibt konstant bei 85 %. Im Szenario GreenLate fällt, entsprechend der Szenariencharakteristik, die Steigerung des Stromanteils bei der Herstellung von Sekundärmetall und Halbzeugen etwas geringer aus. Der verbleibende Endenergiebedarf für Schmelzprozesse wird in allen Szenarien komplett durch Gas gedeckt. Die Umstellung von konventionellem Erdgas auf synthetisches Gas bis 2050 vollzieht sich je nach Szenario jedoch unterschiedlich, siehe Kapitel 5.2.4.

Die Abbildung 5-81 zeigt die Entwicklung des Endenergiebedarfs in den verschiedenen Szenarien. Neben den Umbau auf strombetriebene Öfen wird zudem eine

Energieeffizienzsteigerung von 30 % bis 2050 angenommen, die aber je nach Szenario für die Bezugsjahre 2030 und 2040 unterschiedlich gestaffelt wurde und das dargestellte Ergebnis charakterisieren. Es ist darüber hinaus erkennbar, dass in GreenSupreme bereits 2040 strombasiertes erneuerbares Gas in die allgemeine Gasversorgung gelangt, so dass anteilig erneuerbares Gas in die einzelnen Anwendungen gelangt.

**Abbildung 5-81: Entwicklung des Endenergiebedarfs in der NE-Metallindustrie in den Green-Szenarien**



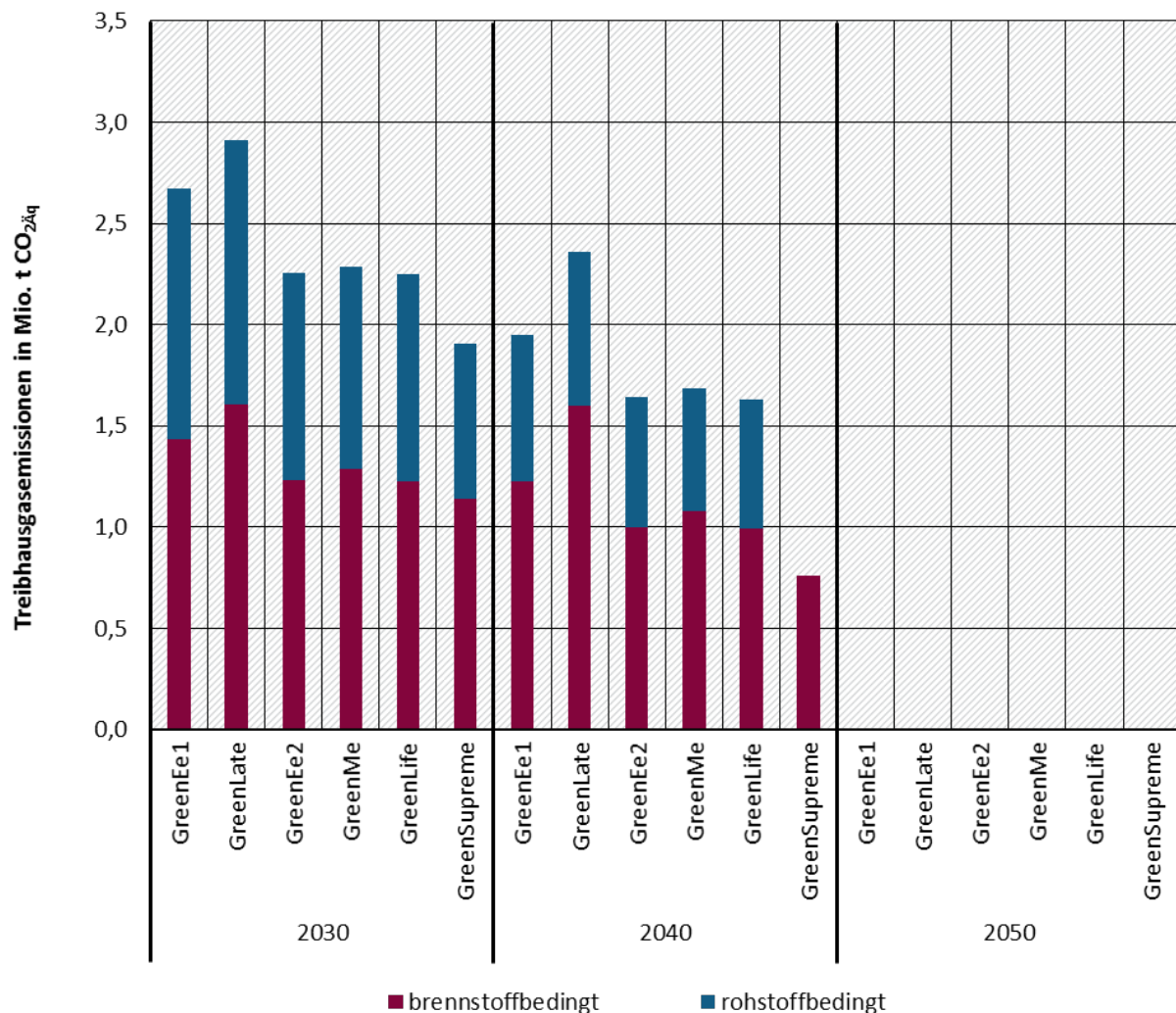
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Zur Vermeidung der prozessbedingten Treibhausgasemissionen in der Primäraluminiumindustrie ist ein Umbau der Produktionsanlagen erforderlich. Hierzu müssen die derzeit eingesetzten Kohlenstoffanoden durch inerte Anoden substituiert werden. Dadurch wird statt CO<sub>2</sub> und PFC nur noch reiner Sauerstoff bei der Schmelzflusselektrolyse freigesetzt. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenLate erfolgt die Umstellung auf inerte Anoden sukzessive ab dem Jahr 2030 bis zur vollständigen Umsetzung dieser Technologie in 2050. Einzig im Szenario GreenSupreme ist bereits 2040 die vollständige Umstellung auf inerte Anoden in der Primäraluminiumindustrie sowie die Umstellung auf synthetischen Kohlenstoff als Reduktionsmittel in den anderen Teilbranchen vollzogen. Dadurch liegen die prozessbedingten Emissionen in GreenSupreme bereits 2040 deutlich niedriger als in den anderen Szenarien.



Abbildung 5-82 zeigt zusammenfassend, dass durch die oben genannten Maßnahmen in den Green-Szenarien eine komplette Eliminierung der direkten Treibhausgasemissionen bis 2050 erreicht werden kann.

**Abbildung 5-82: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der NE-Metallindustrie in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.3.2 Schlussfolgerungen

Um den in den Green-Szenarien skizzierten Treibhausgasminderungsbeitrag in der NE-Metallindustrie zu erreichen sind aus heutiger Sicht nicht nur hohe Ambitionssteigerungen erforderlich, sondern es besteht auch noch erheblicher Forschungsbedarf insbesondere in folgenden Bereichen:

- ▶ Umstellung von Prozessen/Prozessschritten auf strombasierte Verfahren,
- ▶ Umstellung der Primäraluminiumindustrie auf inerte Anoden,
- ▶ Steigerung und Optimierung des Schrottrecyclings sowie bessere Erschließung von Sekundärmaterialien durch eine Urban Mining Strategie sowie



- ▶ die Entwicklung von Maßnahmen zur Dekarbonisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

#### 5.5.4 Gießereien

In Gießereien werden aus verschiedenen metallischen Werkstoffen, wie Eisen, Stahl, Aluminium, Kupfer, Zink und Magnesium, Bauteile und Komponenten hergestellt, die überwiegend im Straßenfahrzeugbau (ca. 57 %) und im Maschinenbau (ca. 24 %) verwendet werden. Aber auch im alltäglichen Umgang sind Gussteile neben der Verwendung in Automobilen z. B. in Heizanlagen, Armaturen, Tür- und Fenstergriffen, Möbelschraubungen oder Accessoires und Designelementen im Einsatz. Auch sind Gussteile wesentliche Bestandteile von Windenergieanlagen (z. B. Nabe, Welle und Getriebe), wobei aktuell je Megawatt installierter Leistung rund 20 t Guss verwendet werden. Neben dieser resultierenden Bedeutung für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien setzt die Gießereiindustrie mit jährlich 5 Mio. t Schrott bereits heute fast ausschließlich Sekundär- bzw. Recyclingmaterialien ein. Aus diesen sowie geringen Mengen an primären Einsatzstoffen werden derzeit jährlich rund 5,2 Mio. t Gussteile hergestellt. Damit ist Deutschland europaweit führend und erzeugt 35 % aller in Europa gegossenen Produkte. Gleichzeitig ist die deutsche Gießereiindustrie stark exportorientiert, wobei 35 % der Gussteile direkt und weitere 45 % über Fertigprodukte exportiert werden (bdguss, 2019).

Gießereien zählen zu den energieintensiven Industriebranchen, weil sowohl zum Erschmelzen der eingesetzten metallischen Werkstoffe als auch für die teilweise bei Aluminium- und Stahlgussteilen notwendige Wärmebehandlung große Energiemengen notwendig sind. Zur Erzeugung der hierfür benötigten Prozesswärme werden fossile Brennstoffe sowie Strom verwendet. Dabei ist der Anteil an Strom beim Schmelzen bereits recht hoch und beträgt bei Eisenmetallgießereien rund 50 % der Schmelzleistung und bei den 3.000-4.000 Schmelzöfen der Nichteisenmetallgießereien ca. 30 % (UBA, 2014b). Direkte energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen ergeben sich aus der Verwendung der o.g. fossilen Brennstoffe. Diese stellen die Hauptherausforderung beim Erreichen einer Treibhausgasneutralität in der Branche dar, weil rohstoffbedingte Prozessemissionen in Gießereien nicht relevant sind.

##### 5.5.4.1 Entwicklung in den Gießereien in den Green-Szenarien

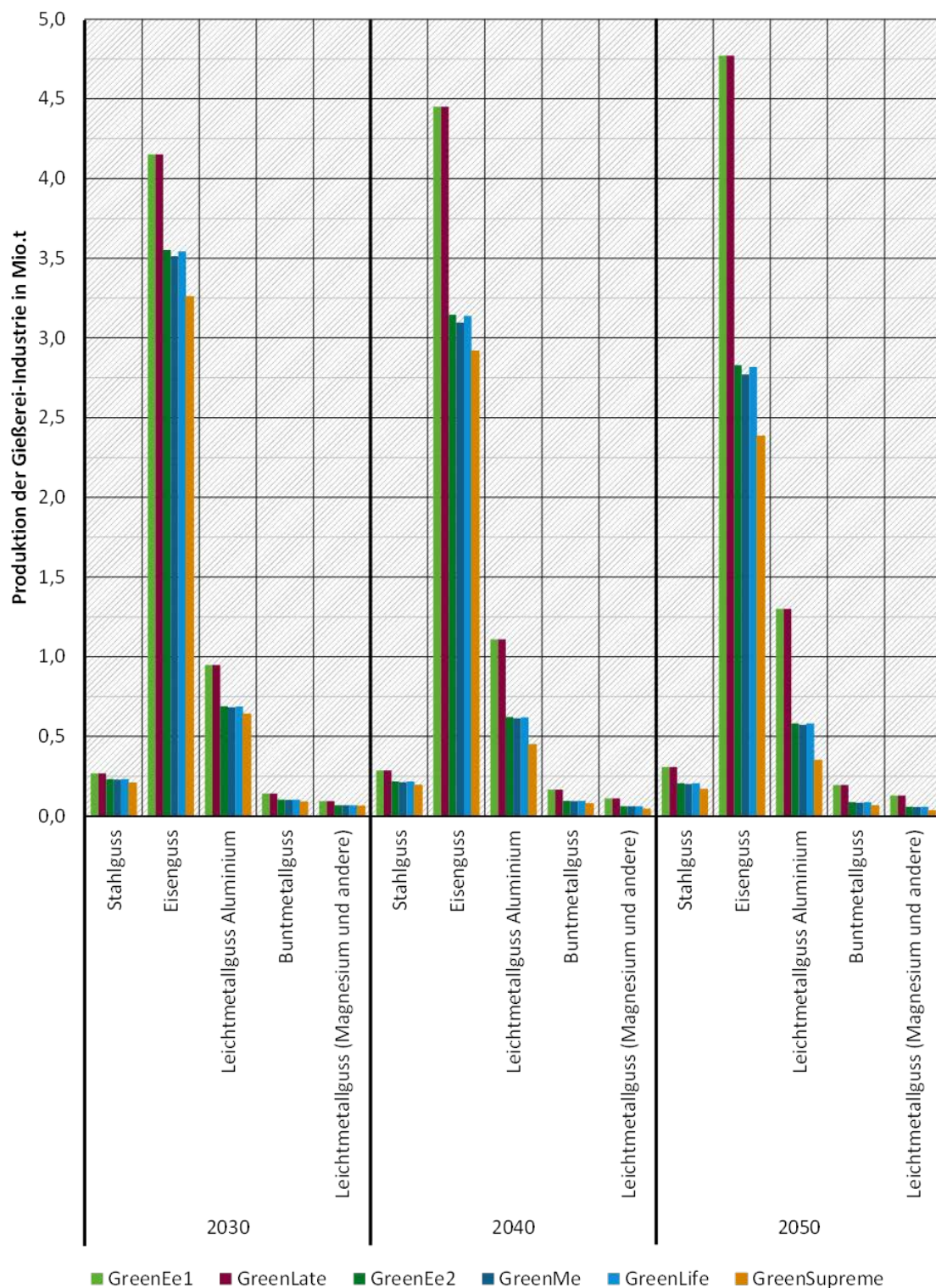
In (UBA, 2014c) wurden bereits die aus heutiger Sicht zur Verfügung stehenden wesentlichen Treibhausgasminderungsmaßnahmen der Gießereiindustrie dargestellt. Dies sind:

- ▶ Substitution von brennstoffbefeuerten Öfen durch elektrisch beheizte Öfen (PtH),
- ▶ Substitution von koksbeheizten Kupolöfen durch gasbeheizte bzw. kokslose Kupolöfen (PtG),
- ▶ Erhöhung der Energieeffizienz der Schmelzöfen,
- ▶ Steigerung der Ausbringung an Gussteilen (Metallausbringung) bzw. Reduzierung des Anteils an Kreislaufmaterial,
- ▶ Effizienzsteigerungen entlang der gesamten Prozessketten sowie
- ▶ konsequente Abwärmenutzung inkl. Abwärmeverstromung.

Die gießereispezifischen Annahmen für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 für die Green-Szenarien basieren größtenteils auf (UBA, 2014c). Die Metallausbringung wird in allen Szenarien

von heute 65 % auf 90 % gesteigert. In GreenLate erfolgt dies, entsprechend der Szenariencharakteristik, im geringeren Maße, so dass bis 2050 lediglich 75 % erreicht werden. Weiterhin wird in GreenLate ein höherer Endenergieverbrauch (EEV) durch geringere Energieeffizienz sowie eine deutlich langsamere Umstellung der Energieträger sowie Erzeugungstechniken für Prozesswärme angenommen. Im Unterschied zu GreenEe1 und GreenLate wird in den weiteren Szenarien nicht von einer Steigerung der Produktionsmenge bis 2050 ausgegangen, sondern diese modellendogen ermittelt. So ergeben sich Rückgänge der Produktionsmengen bis 2050 im Vergleich zu 2010 auf 79 % in GreenEe2 und GreenLife und 78 % in GreenMe. In GreenSupreme ergeben sich noch stärkere Rückgänge auf 63 %. Hauptursachen hierfür sind der technologiewechselbedingte verringerte Gussbedarf im Bereich des Straßenfahrzeugbaus sowie Produktionsmengenrückgänge für bestimmte Endprodukte (z. B. Automobile) durch geringere Nachfrage und einer ausgeglichenen Handelsbilanz.

Wie Abbildung 5-83 zeigt, nehmen die absoluten Produktionsmengen für die verschiedenen Gruppen von Gusswerkstoffen für die Jahre 2030, 2040 und 2050 mit Ausnahme von GreenEe1 und GreenLate z. T. erheblich ab. Beispielsweise ergeben sich vor dem Hintergrund der Vielzahl von Annahmen im Nachfragebereich im Jahr 2050 szenariospezifischen Produktionsmengen für Eisenguss von 2,8 bis 2,4 Mio. t und für Aluminiumguss von 0,6 bis 0,4 Mio. t. Hauptursache für sinkende Produktionsmengen von Gusserzeugnissen ist die Verringerung der Exportintensität durch ausgeglichene Handelsbilanzen. Besonders deutlich wird dieser Effekt beim Vergleich der Produktionsmengen zwischen GreenEe1 und GreenEe2. Die technologischen Annahmen dieser Szenarien sind identisch, ausschließlich die ausgeglichene Handelsbilanz über alle Bereiche hinweg charakterisiert den Unterschied der beiden Szenarien.

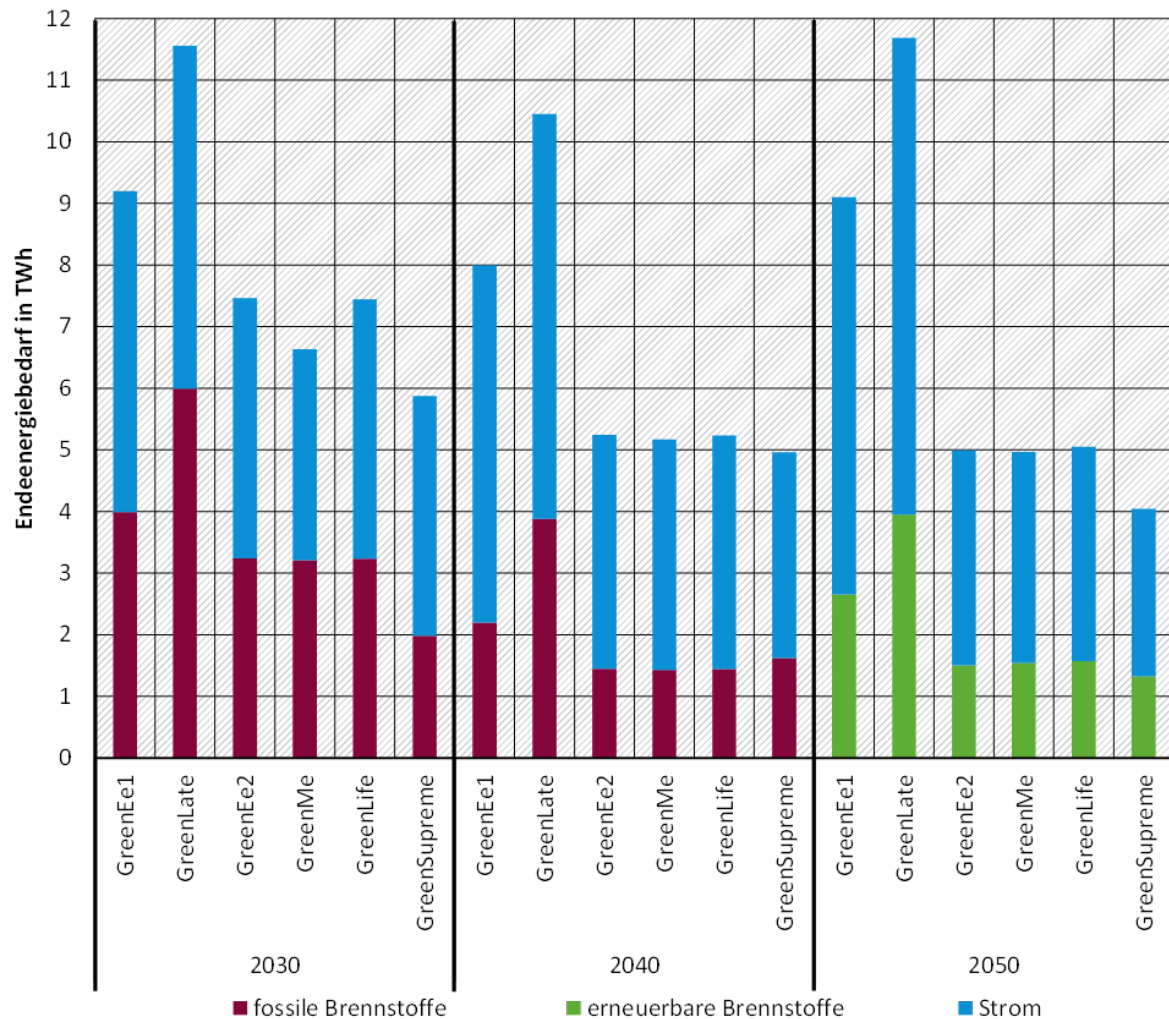
**Abbildung 5-83: Entwicklung der Produktionsmengen in der Gießereiindustrie für verschiedene Gusswerkstoffe in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die sich aus den technischen Annahmen und den Entwicklungen zur Produktion ergebenden Endenergiebedarfe sind in Abbildung 5-84 zu sehen. Auch hier wird der Unterschied durch die exogene Produktionsvorgabe in GreenEe1 und GreenLate sehr deutlich. So werden in GreenEe1 2050 9,1 TWh/a benötigt in GreenEe2, GreenMe und GreenLife nur rund 5 TWh. In GreenLate

wirkt zusätzlich die verspätete Umstellung auf klimafreundliche Techniken und Energieträger sowie das geringere Ambitionsniveau im Bereich Energie- und Materialeffizienz, so dass der Endenergiebedarf um 25 % im Vergleich zu GreenEe1 sowie den Faktor 2 bis 3 gegenüber den anderen Szenarien liegt. Aufgrund des hohen Ambitionsniveaus in GreenSupreme ist hier der Endenergiebedarf mit 4 TWh in 2050 am geringsten. Weiterhin wird aus Abbildung 5-84 deutlich, dass der Grad der Elektrifizierung der Prozesswärmeanlagen für alle Szenarien über die drei Stützjahre steigt und eine Umstellung der verbleibenden brennstoffbefeuerten Öfen auf erneuerbare Gase zwischen 2040 und 2050 erfolgt. Mit Letzterem ist insbesondere die Substitution von koksbeheizten Kupolöfen durch gasbeheizte bzw. kokslose Kupolöfen gemeint. Dabei wird angenommen, dass über den gesamten Zeitraum ein Teil der koksbeheizten Kupolöfen durch strombasierte Öfen (z. B. Induktionsöfen) und ein Teil ab 2025/2030 durch gasbeheizte Kupolöfen substituiert wird. Letztere werden dabei bis 2040 noch mit fossilem Erdgas und ab 2040 mit erneuerbarem strombasiertem Gas betrieben. Im Vergleich zur UBA-Publikation „THGND 2050“ (UBA, 2014c) zu deren Zeitpunkt bereits einige dieser Öfen in der Praxis angewendet wurden, konnte sich diese Technik nicht am Markt durchsetzen und Anlagen wurden rückgebaut. Gründe sind dabei (verfahrens-)technischer sowie marktwirtschaftlicher Natur. Für die Green-Szenarien wurde angenommen, dass diese Technik bis 2025/2030 so weiterentwickelt wird, dass die technischen Probleme überwunden werden und sie einsatzbereit ist. Gleichzeitig werden die marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen für ihren Einsatz verbessert, sodass sie konkurrenzfähig ist. Die Verwendung von Koks (fossil oder erneuerbar) ist für eine nachhaltige Entwicklung bis 2050 im Kontext der Treibhausgasneutralität nicht zielorientiert und wird daher in den Szenarien ausgeschlossen. Gleichwohl wird die vollständige Umstellung auf strombasierte Öfen verfahrenstechnisch problematisch, weil hierdurch vermutlich auch zukünftig bestimmte Schrottqualitäten und damit Einsatzstoffe nicht verwendet werden können. Vor diesem Hintergrund verbleibt in den Green-Szenarien ein geringer Anteil an kokslosen Kupolöfen, welche mit erneuerbarem strombasiertem Gas betrieben werden.



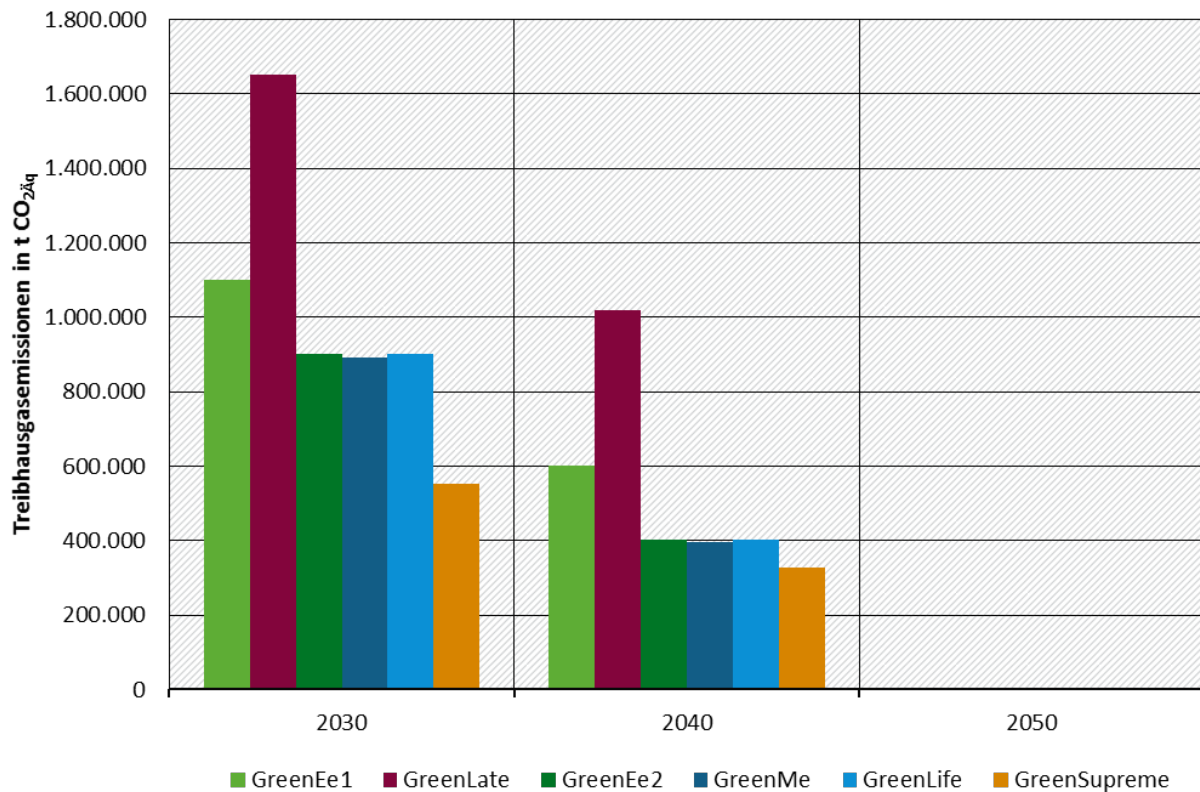
**Abbildung 5-84: Entwicklung der Endenergiebedarfe in der Gießereiindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

In Abbildung 5-85 wird deutlich, dass für alle betrachteten Szenarien die direkten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) über die drei Stützjahre sinken und im Jahr 2050 vollständig vermieden werden. In Gießereien handelt es sich um direkte energiebedingte THG-Emissionen, die durch die Verwendung fossiler Brennstoffe entstehen, insbesondere für die Erzeugung von Prozesswärme z. B. zum Erschmelzen der metallischen Werkstoffe. Aufgrund des o. g. Technologiewechsels zwischen 2040 und 2050 weg vom koksbeheizten hin zum gasbeheizten Kupolofen auf Basis erneuerbare Brennstoffe können in allen Szenarien die THG-Emissionen um 100 % gemindert werden. Für die Stützjahre 2030 und 2040 wird bei GreenEe1 und GreenLate deutlich, dass trotz angenommener Produktionssteigerungen die THG-Emissionen wegen des Wechsels von brennstoffbeheizten hinzu strombasierten Öfen abnehmen. Dennoch sind die THG-Emissionen im Vergleich zu den anderen vier Szenarien produktionsmengenbedingt höher. Für GreenLate wird auch deutlich, dass die verspätete Umstellung auf klimafreundliche Techniken und Energieträger sowie das geringere Ambitionsniveau im Bereich Energie- und Materialeffizienz die THG-Emissionen um 50 bis 60 % im Vergleich zu GreenEe1 sowie um den Faktor 2 bis 3 gegenüber den anderen Szenarien erhöht sind. Aufgrund der sehr ambitionierten Annahmen für GreenSupreme und den Verzicht auf den Einsatz von Kohle ab 2040, ergeben sich 2030 und 2040 die geringsten

Treibhausgasemissionen, wobei die THG-Mengenunterschiede im Jahr 2030 stärker ausgeprägt sind und sich 2040 bis auf GreenLate angleichen.

**Abbildung 5-85: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Gießereiindustrie in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### 5.5.4.2 Schlussfolgerungen

Die Gießereiindustrie ist und bleibt wesentlicher Hersteller und Zulieferer relevanter Bauteile insbesondere für die Windenergiebranche und die Automobilindustrie und wird daher im gesamten Transformationsprozess hin zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland von großer Bedeutung sein.

Um den in den Green-Szenarien skizzierten Treibhausgasminderungsbeitrag in der Gießereiindustrie zu erreichen, sind aus heutiger Sicht hohe Anstrengungen im Bereich Forschung und Entwicklung, Markteinführungen und Diffusion von neuen Techniken notwendig. Dabei besteht branchenspezifischer Forschungsbedarf in folgenden Bereichen:

- ▶ Koksloser Kupolofen,
- ▶ strombasierte Prozesswärmeerzeugung (Schmelzen und Wärmebehandlung),
- ▶ Gusslegierungen und Verfahren zur Reduzierung/Vermeidung von Wärmebehandlung im Bereich Stahl- und NE-Metallguss,
- ▶ energetische Optimierung von Einzelprozessen und Prozessketten,

- ▶ Steigerung der Metallausbringung durch Reduzierung/Vermeidung von Gießsystemen und damit von Rücklaufmaterial sowie durch Reduzierung/Vermeidung von Gussfehlern und damit von Ausschuss.

### 5.5.5 Chemische Industrie

Die chemische Industrie in Deutschland ist eine der wichtigsten Industriebranche in Deutschland. So arbeiteten im Jahr 2018 in über 2000 Betrieben der chemischen und pharmazeutischen Industrie über 460.000 Beschäftigte und erzeugten so einen Umsatz von etwa 203 Mrd. € (Statistisches Bundesamt, 2019a). Die Produktpalette ist vielfältig und reicht von anorganischen und organischen Grundchemikalien und Polymeren über Fein- und Spezialchemikalien und Pharmazeutika bis zu Wasch- und Körperpflegemitteln.

Ein wesentlicher Rohstoff für die organische Chemie ist mit einem Anteil von 75 % Erdöl basiertes Naphta (ca. 15,1 Mio. t in 2017), welches als Produkt in Raffinerien erzeugt wird. Weitere fossile Rohstoffe sind Erdgas (2,3 Mio. t in 2017, (VCI, 2019)) und Kohle (0,1 Mio. t in 2017, (VCI, 2019)). Nachwachsende Rohstoffe werden zu 13 % bzw. in Höhe von 2,7 Mio. t verwendet (VCI, 2019).

#### 5.5.5.1 Entwicklung der chemischen Industrie in den Green-Szenarien

Grundlegend können die Treibhausgasminderungen in der chemischen Industrie durch folgende Maßnahmen erzielt werden:

- ▶ Vermeiden und Verringern von treibhausgasintensiven Produktionstechniken und Produkten,
- ▶ Substituieren von fossilen Energieträgern und Umstellen auf erneuerbare Energien basierte Produktionsverfahren,
- ▶ Steigern und Optimieren der Produktionstechniken sowie
- ▶ Erhöhen der Energieeffizienz.

Die Minderung der energiebedingten Treibhausgasemissionen kann durch Substitution der fossilen Brenn- und Rohstoffe realisiert werden. Dabei sollte insbesondere bei der Prozesswärmeversorgung, dort wo technisch möglich, erneuerbarer Strom direkt genutzt werden.

Für die chemische Industrie wird vor dem Hintergrund der Heterogenität und komplexen Produktionsprozesse sehr konservativ für alle Green-Szenarien von einem gleichbleibenden Rohstoffbedarf ausgegangen. Dieser entspricht einem Energieäquivalent von 282 TWh pro Jahr oder etwa 18,3 Mio. t Methan plus 0,1 Mio. t Holzkohle (siehe (UBA, 2014c), Tabelle D-19, S. 174). Es wird angenommen, dass die chemische Industrie bis 2050 in allen Green-Szenarien vollständig auf erneuerbare strombasierte Ausgangsstoffe und erneuerbare Energieträger umgestellt wird. Dies bedeutet, dass bspw. die Kunststoffherstellung oder die Herstellung von Industrieruß, z. B. für die Reifenproduktion, auf PtL-Produkten als Rohstoff basiert. Die konservative Annahme zur Bedarfsentwicklung impliziert, dass die wirtschaftliche Entwicklung der chemischen Industrie in diesem Bereich vom Rohstoffbedarf entkoppelt ist, bzw. dass steigender Rohstoffbedarf durch gesteigerte Rohstoffeffizienz ausgeglichen wird. Darüber hinaus beeinflusst diese konservative Annahme im erheblichen Ausmaß die Entwicklung der Bedarfe an importierten erneuerbaren Kohlenstoffträgern, siehe dazu Kapitel 5.2.4 und TextBox 5-2. Es liegt nahe, dass nachfrageseitige Änderungen, in den Szenarien GreenEe2, GreenMe,

GreenLife und GreenSupreme, zu einem sinkenden Rohstoffbedarf führen. Die komplexen Produktionsstrukturen in der chemischen Industrie konnten modellendogen jedoch nicht hinreichend abgebildet werden und auf eine exogene pauschale Änderung wurde verzichtet.

Vor dem Hintergrund höherer anzustrebender Recyclingraten und Lebensdauern von Produkten wird in den Green-Szenarien unterstellt, dass bereits 2030 Teile der chemischen Industrie auf fossile Energieträger verzichten und auf PtG/PtL-Produkten basieren, damit bei der späteren Entsorgung (Verbrennung) der hergestellten Endprodukte in 2050 oder später keine fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr entstehen.<sup>105</sup>

Des Weiteren wird in den Green-Szenarien unterstellt, dass die derzeit fossile Wasserstoffwirtschaft auf erneuerbaren Wasserstoff umgestellt wird, der mittels erneuerbaren Stroms durch Elektrolyse erzeugt wird. Wie in der Stahlindustrie wird unterstellt, dass dieser Wasserstoff bedarfsgerecht am Produktionsstandort oder standortnah<sup>106</sup> erzeugt wird. Entsprechend der Szenariencharakteristiken erfolgt diese Umstellung und Energiewende in der chemischen Industrie in GreenLate verzögert und in GreenSupreme deutlich schneller als in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife. So wird bspw. für die Ammoniakproduktion in GreenLate unterstellt, dass in 2050 noch 30 % des Wasserstoffs über die Dampfreformierung von erneuerbarem Gas erfolgt. Wohingegen in allen anderen Szenarien die Ammoniakproduktion vollständig auf lokal erzeugten PtG-Wasserstoff basiert.

Neben der Substitution der Energieträger wird allgemein eine Steigerung der Energieeffizienz von 1,5 % pro Jahr angenommen. In GreenLate wird entsprechend der Szenariencharakteristik eine geringere Steigerung von nur 0,56 % pro Jahr angenommen.

Bei der Salpeter- und Adipinsäureproduktion führt eine effizientere Distickstoffmonoxidabscheidung (Lachgas) in allen Green-Szenarien zu geringeren prozessbedingten Treibhausgasemissionen. In GreenMe wird zudem ein alternativer Produktionsprozess für Adipinsäure mit Nutzung von Butadien als Rohstoff angenommen. Dies führt zum Ersatz der Salpetersäure und daher noch geringeren Lachgasemissionen.

Entsprechend der identischen Annahme zur Entwicklung der chemischen Industrie wird der Endenergieverbrauch durch die Geschwindigkeit und das Ambitionsniveau bei der Umstellung der Produktionsverfahren auf erneuerbare Energie bestimmt. In Abbildung 5-86 sind die Endenergiebedarfe der chemischen Industrie in Deutschland zu sehen. Es zeigt sich insgesamt nur ein leichter Rückgang des Endenergieverbrauchs zwischen 2030 und 2050 von etwa 450 TWh auf 400 TWh. Eine Ausnahme stellt GreenLate dar. In diesem Szenario steigt der Endenergieverbrauch aufgrund der geringeren Effizienzsteigerungen und der verzögerten Umstellung der Wasserstoffwirtschaft auf strombasierte Wasserstoffelektrolyse von 430 TWh in 2030 an und erreicht 2050 etwa 450 TWh. In 2030 liegt der Endenergiebedarf in GreenLate niedriger als in den anderen Szenarien, da in den anderen Szenarien bereits die Umstellung der Wasserstoffwirtschaft und damit dem branchenspezifischen Anstieg des Strombedarfs erfolgt. In Abbildung 5-86 sind zur Information nachrichtlich die national erzeugte Wasserstoffmenge für die chemische Industrie mit dargestellt.

Bis zum Erreichen der vollständigen Versorgung der chemischen Industrie mit erneuerbaren Rohstoffen in 2050 wird ein Großteil der organischen Kohlenstoffe aus fossilen Rohstoffen gewonnen (siehe Abbildung 5-86). Wesentlicher Rohstoff für die organische Chemie ist mit einem Anteil von etwa 75 % Erdöl basiertes Naphtha (ca. 15,1 Mio. t in 2017), welches als

---

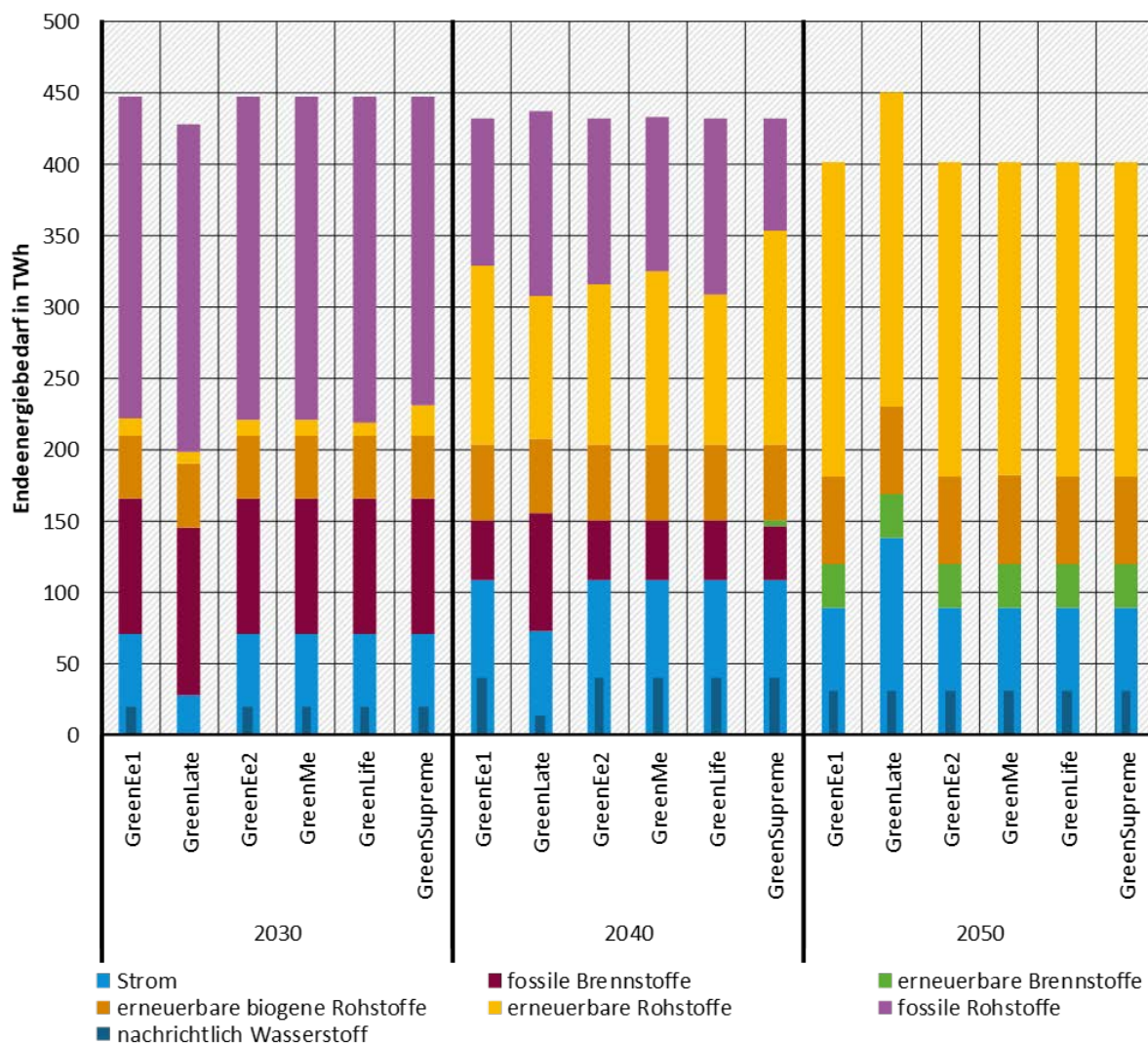
<sup>105</sup> Siehe Kapitel 5.2.4, so wird für die erforderlichen Klimaschutzeffekte unterstellt, dass es sich um zusätzlichen vollständigen erneuerbaren Strom handelt.

<sup>106</sup> Versorgung über kleine dezentrale industriell genutzte Wasserstoffnetze, wie sie bereits heute bspw. im Ruhrgebiet existieren.



Produkt in Raffinerien erzeugt wird. Weitere fossile Rohstoffe sind Erdgas (2,3 Mio. t in 2017, (VCI, 2019) und Kohle (0,1 Mio. t in 2017, (VCI, 2019)). Es ist zu erwarten, dass die Produktion von Naphtha in den Raffinerien der Nachfrage aus der chemischen Industrie folgen wird und z.T. die Raffineriekapazitäten umgebaut werden, um alternativ erneuerbare Rohstoffe zu verarbeiten. Diese nahezu treibhausgasneutralen Produkte werden der chemischen Industrie und zur allgemeinen Versorgung in Bereichen, welche nicht direkt elektrisch versorgt werden können, zu Verfügung gestellt. In 2050 sind dann nach den Annahmen und Ergebnissen der Szenarien (siehe Kapitel 5.2) alle Kapazitäten der Raffinerien und Petrochemie in Deutschland auf erneuerbare, treibhausgasneutrale Rohstoffe umgestellt (siehe Abbildung 5-86).

**Abbildung 5-86: Endenergiebedarf der chemischen Industrie in den Green-Szenarien**

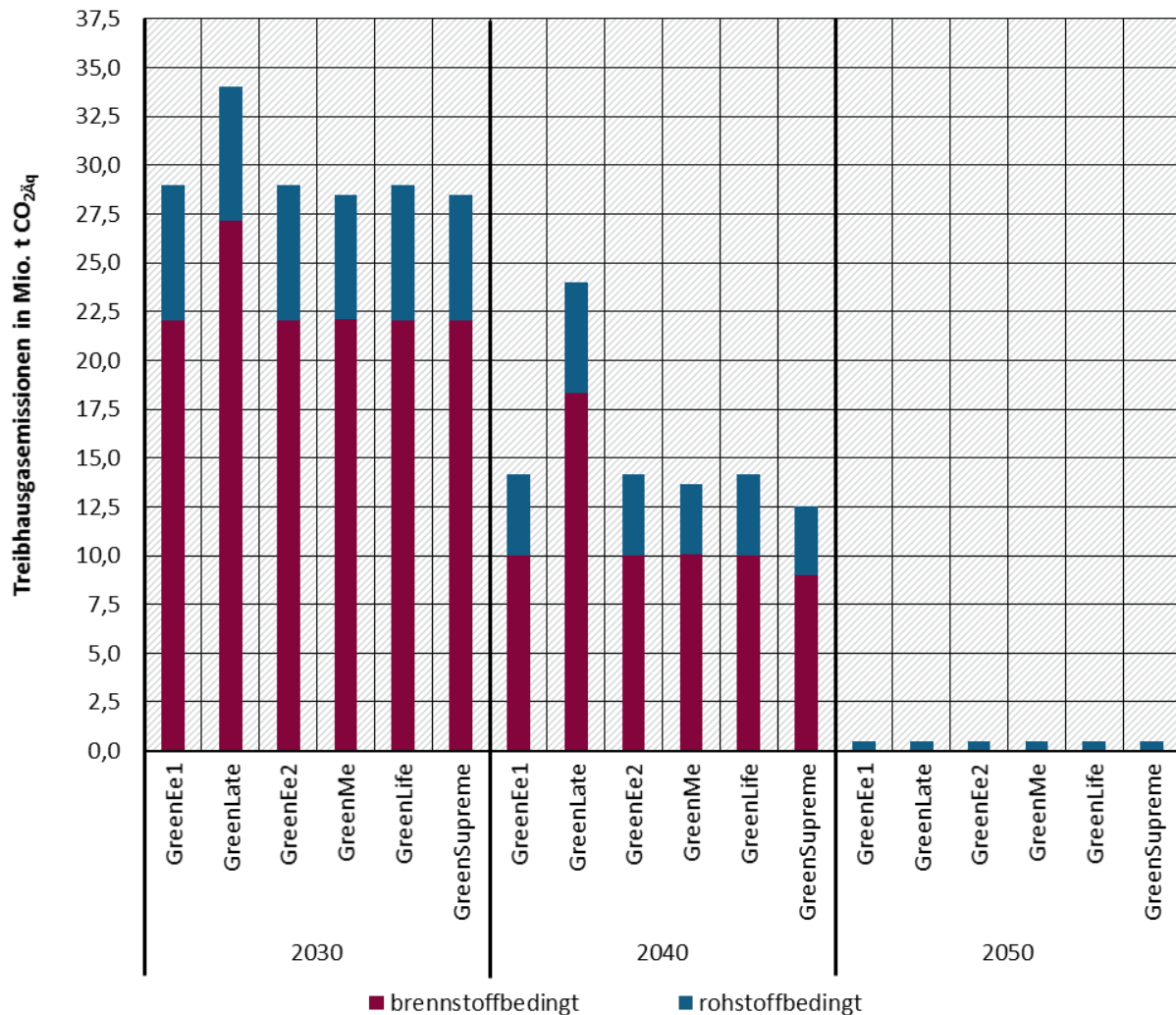


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger und Rohstoffe und Effizienzgewinne resultierende Entwicklung der Treibhausgasemissionen ist in Abbildung 5-87 zu sehen. Bis 2050 ist ein starker Rückgang der Treibhausgasemissionen in allen Green-Szenarien zu erkennen. Jedoch können die Treibhausgasemissionen in der chemischen Industrie nicht vollständig vermieden werden, es verbleiben 500.000 t CO<sub>2</sub>Äq. Die in 2050 noch auftretenden THG-Emissionen stammen nicht aus der Verwendung von Energieträgern, sondern sind prozessbedingt, vor allem aus der Freisetzung von Lachgas (N<sub>2</sub>O) bei der Salpeter- und

Adipinsäureproduktion. Ausführlichere Beschreibungen finden sich in Kapitel D 5 in (UBA, 2014c).

**Abbildung 5-87: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der chemischen Industrie in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.5.2 Schlussfolgerungen

Die chemische Industrie als energieintensive Branche ist geprägt durch die Vielzahl an unterschiedlichen Produkten und heterogenen Produktionsverfahren. Die Umstellung unzähliger Prozesse vom Einsatz fossiler Brennstoffe auf den direkten Einsatz von (erneuerbarem) Strom ist daher bereits eine große Herausforderung. Noch größer sind allerdings die Herausforderungen, die sich aus der Umstellung der Rohstoffbasis von fossilen auf erneuerbare Kohlenstoffträger ergeben. In Hinblick auf die Effizienz des Gesamtsystems aus Stromerzeugung, PtG/PtL-Erzeugung und deren Weiterverarbeitung erscheint es geboten, die Prozessketten in der chemischen Industrie je nach Produkt auf unterschiedliche PtG/PtL-Produkte umzustellen, um die Umwandlungsverluste und damit den erheblichen Strombedarf für die Rohstoffbereitstellung zu begrenzen. Hier besteht noch Forschungsbedarf, welche Prozesse sinnvollerweise auf welche PtG/PtL-Produkte umgestellt werden können, um eine effiziente Transformation der Chemieindustrie zu ermöglichen.

Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf, wie die Treibhausgasemissionen bei der Salpeter- und Adipinsäureproduktion weiter gemindert oder durch alternative Verfahren oder Produkte vollständig vermieden werden können.

### **5.5.6 Zementindustrie**

Zement ist ein Baustoff, dessen wichtigstes Anwendungsgebiet die Herstellung von Beton ist, der vor allem im Straßen- und Wohnungsbau benötigt wird. Einhergehend mit der Zementherstellung ist die Freisetzung von CO<sub>2</sub> sowohl aus Brenn- als auch Rohstoffen. Mit Emissionen in Höhe von etwa 20 Mio. t CO<sub>2</sub><sup>107</sup> gehört (DEHSt, 2019) die Zementindustrie einerseits zu den relevantesten Treibhausgasemittenten im Industriebereich, wo im Sinne der Dekarbonisierung dringender Handlungsbedarf besteht. Andererseits steht sie aufgrund der relevanten Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus den eingesetzten Rohstoffen vor einer besonders großen Herausforderung, diese CO<sub>2</sub>-Emissionen wirksam zu reduzieren.

#### **5.5.6.1 Entwicklungen der Zementindustrie in den Green-Szenarien**

Nach (UBA, 2014c) stehen der Zementindustrie bezogen auf den eigentlichen Produktionsprozess aus heutiger Sicht im Wesentlichen folgende Maßnahmen zur Minderung ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Verfügung:

- ▶ Erhöhung der thermischen Energieeffizienz,
- ▶ Steigerung der elektrischen Energieeffizienz,
- ▶ weit(er)gehende Substitution fossiler Energieträger,
- ▶ verstärkte Nutzung sekundärer Rohstoffe in der Zementklinkerproduktion,
- ▶ Entwicklung neuer CO<sub>2</sub>-armer Zemente mit geringem Zementklinkeranteil und
- ▶ Entwicklung neuer CO<sub>2</sub>-armer, zementähnlicher Baustoffe (alternative Bindemittel).

Eine weitestgehende Verminderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie ist allerdings nicht allein durch Maßnahmen im Bereich der Produktion möglich. Vielmehr müssen Maßnahmen auch in den nachfolgenden Bereichen der Wertschöpfungskette, wie der Betonindustrie oder der Art und Weise, wie gebaut wird, eingeschlossen werden. Diese können die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Zementindustrie indirekt beeinflussen, wenn z. B. der Zementanteil im Beton oder im Bauwerk reduziert werden kann.

Ein Großteil der Annahmen für die folgenden Betrachtungen wurde aus der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c) übernommen. Entsprechend der Szenariencharakteristiken (siehe Kapitel 3.1) wurden einzelne Parameter in den betrachteten Szenarien variiert.

So wurde in (UBA, 2014c) angenommen, dass der Klinkerfaktor<sup>108</sup> bis zum Jahr 2050 weiter gesenkt werden kann. Dies erfolgte vor dem Hintergrund der Entwicklungen in der Stahlindustrie, die vorerst einen nahezu vollständigen Wegfall der für die Zementindustrie als alternativer Zuschlagstoff (Klinkerersatzstoff) zur Verfügung stehenden Hüttensandmengen prognostizieren, mehr als optimistisch. Abweichend davon wird nun in allen betrachteten

---

<sup>107</sup> Angaben für das Jahr 2017, ohne Berücksichtigung biogener CO<sub>2</sub>-Emissionen.

<sup>108</sup> Der Klinkerfaktor ist hier das Verhältnis aus Zementklinker bzw. neuartigem Bindemittel und dem fertigen Produkt Zement.

Szenarien angenommen, dass der Klinkerfaktor aufgrund des wegfallenden Hüttensands im Vergleich zum Jahr 2010 (Klinkerfaktor 0,77) im Jahr 2050 auf 0,9 ansteigt.<sup>109</sup> In GreenSupreme wird bereits 2040 auf die Nutzung von Kohle verzichtet, so dass die Umstellung der Stahlindustrie zügiger erfolgt und daher bereits im Jahr 2040 Hüttensand nicht mehr zur Verfügung steht und durch Zementklinker oder - sofern geeignet und verfügbar - auch alternative Zuschlagstoffe, wie ungebrannten Kalkstein, ersetzt werden muss.

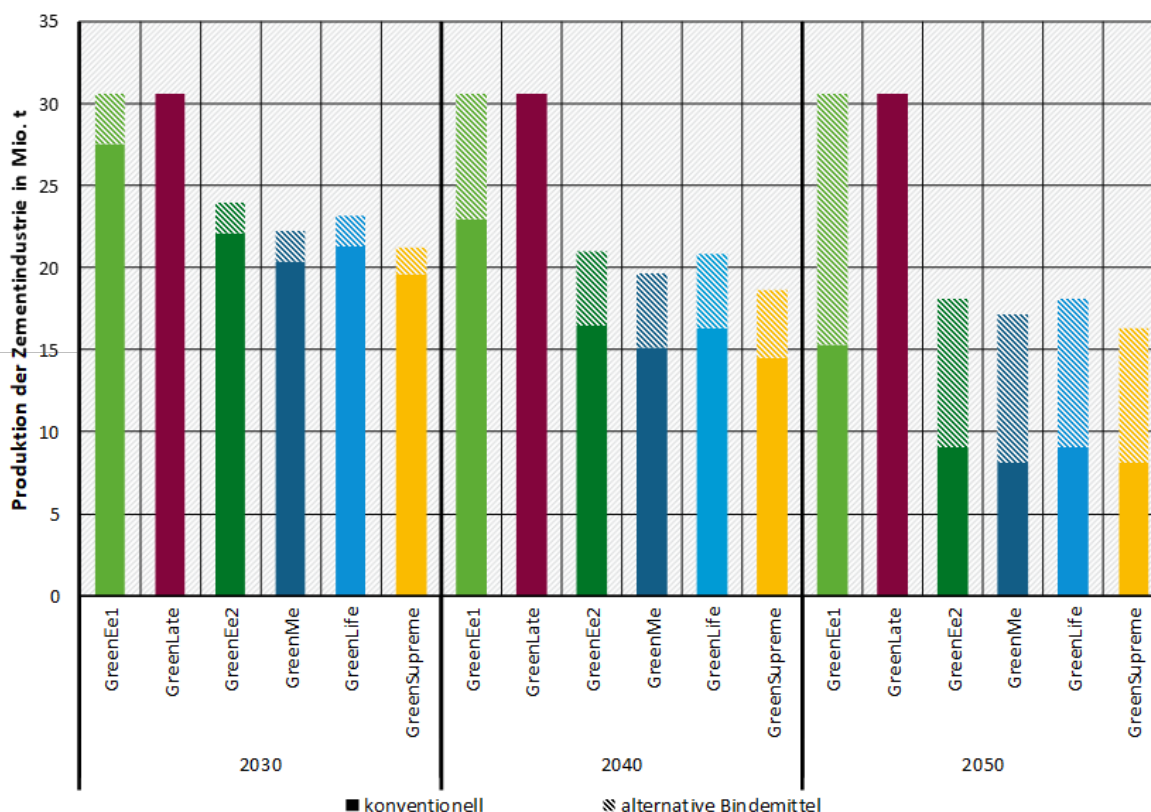
Darüber hinaus wird in allen betrachteten Szenarien, außer GreenLate, die Entwicklung von alternativen Bindemitteln unterstellt. Derzeit wird zwar intensiv an diesem Thema geforscht, allerdings konnte die allgemeine Praxistauglichkeit in großem Maßstab bisher noch nicht erreicht werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Forschungen intensiviert werden und erfolgreich sind, so dass der Anteil an alternativen Bindemitteln langsam ansteigt und im Jahr 2050 ein Anteil von 50 % erreicht wird. In GreenLate werden diese Forschungstätigkeiten und Entwicklungen nicht in ausreichendem Maße verfolgt oder die Aktivitäten führen zu keinen Erfolgen, so dass in diesem Szenario keine alternativen Bindemittel berücksichtigt werden. Dies, sowie die Produktionsentwicklung sind in Abbildung 5-88 zu sehen.

In den Szenarien GreenEe1 und GreenLate wird von einer konstanten Produktionsmenge von 30,6 Mio. t in den Jahren 2030, 2040 sowie 2050 ausgegangen. Dies entspricht der Gesamtproduktion des Jahres 2010 (UBA, 2014c). Die Annahmen für die Produktionsentwicklung in den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wurden modellendogen ermittelt, siehe Kapitel 4. Produktionsrückgänge in diesen Szenarien sind z. B. auf Auswirkungen des demografischen Wandels (geringerer Zementverbrauch pro Kopf) und Veränderungen in der Art und Weise, wie zukünftig gebaut wird (z. B. Bauen mit Holz, Carbonbeton), zurückzuführen. Der größte Produktionsrückgang gegenüber dem Jahr 2010 ist für das Szenario GreenSupreme zu verzeichnen (bis 2050: -47 %). Für die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife ergeben sich ebenfalls Produktionsrückgänge bis 2050 von über 40 %, siehe Abbildung 5-88.

---

<sup>109</sup> Dies ist ebenfalls in der Produktionsentwicklung berücksichtigt.



**Abbildung 5-88: Entwicklung der Produktionsmengen in der Zementindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Der resultierende Endenergiebedarf ist zum einen direkt an die Produktionsmengenentwicklung gekoppelt und basiert zum anderen auf der Annahme, dass der thermische Endenergiebedarf für die Herstellung alternativer Bindemittel im Jahr 2050 nur halb so groß ist, wie der für die konventionelle Zementherstellung heute. Für den Zeitraum 2010 bis 2050 wird in allen betrachteten Szenarien eine lineare thermische Effizienzsteigerung bei der konventionellen Herstellung von Zement um 10 % bis 2050 unterstellt. Zusätzlich ist berücksichtigt, dass der spezifische Strombedarf für die konventionelle Zementherstellung bis zum Jahr 2050 linear um 30 % sinkt, während der für die alternativen Bindemittel bis zum Jahr 2050 linear um 50 % im Vergleich zum heutigen konventionellen Prozess abnimmt. Diese Annahmen werden als optimistisch eingeschätzt. Gegenläufig wirkt in allen Szenarien der erwartete Wegfall der Klinkerersatzstoffe, weshalb für eine gleiche Menge an Zement etwa 16 % mehr Klinker oder entsprechend mehr alternative Bindemittel benötigt werden.

In allen Green-Szenarien ergibt sich ein im Vergleich zum Basisjahr 2010 abnehmender Gesamtendenergiebedarf, siehe Abbildung 5-89. Einzig im Szenario GreenLate ist ein steigender Endenergiebedarf zu verzeichnen. Dies ist auf die Annahme zurückzuführen, dass im Szenario GreenLate keinerlei alternative Bindemittel in der Gesamtproduktionsmenge berücksichtigt werden.

Unberücksichtigt bleibt der elektrische Endenergiebedarf für zusätzliche Maßnahmen im Kontext der Dekarbonisierung der Zementindustrie. So kann für die Bereitstellung von strombasierten Energieträgern (PtG/PtL, siehe Kapitel 5.2.1.1.1) CO<sub>2</sub> aus der Zementindustrie abgeschieden und genutzt werden (CCU). Der hierfür benötigte Energieaufwand (Stromverbrauch) wird nicht der Branche, sondern dem Umwandlungssektor der

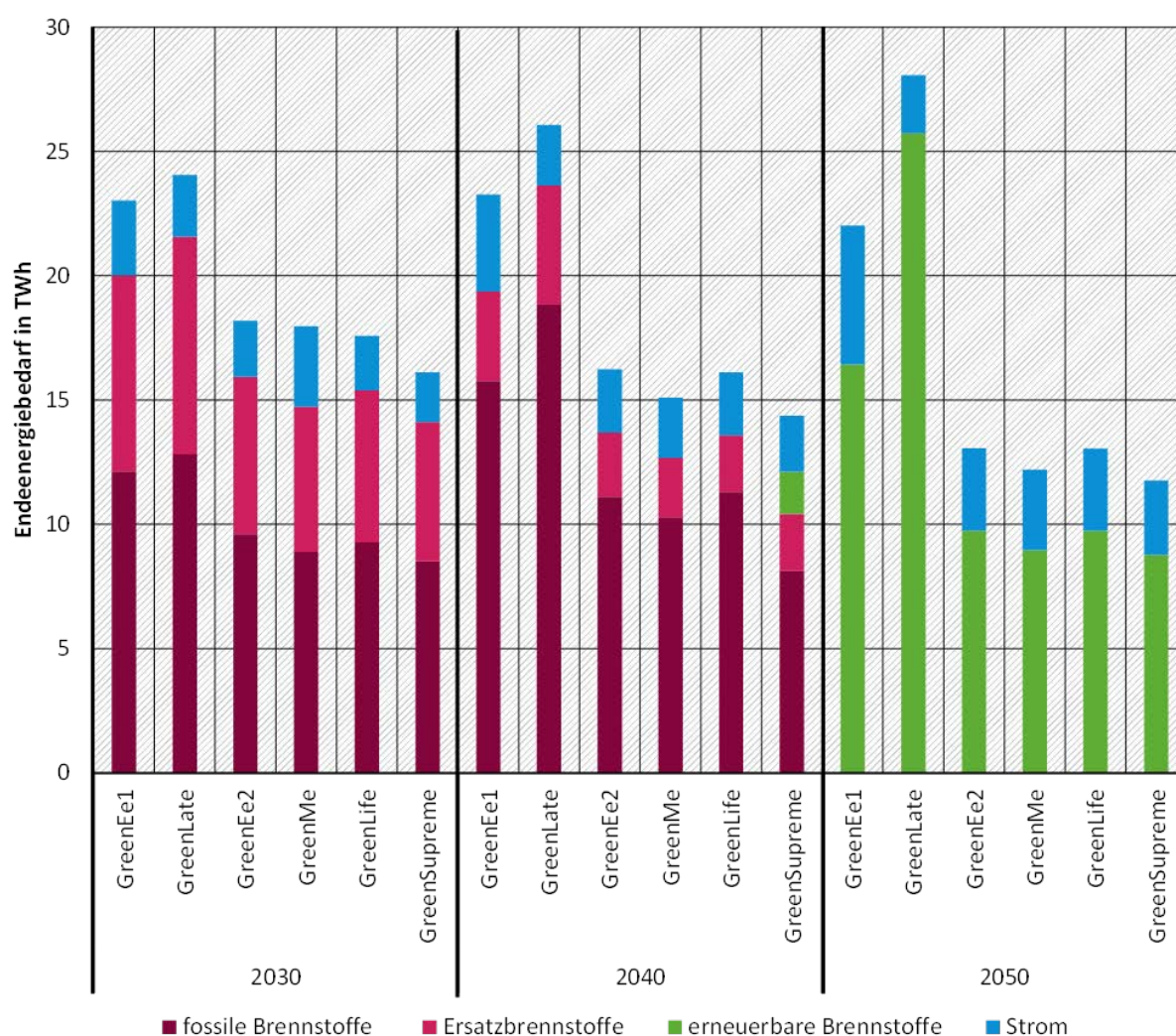
Energiewirtschaft zugeordnet und ist daher nicht in Abbildung 5-89 enthalten. Auch prozessinterne Verfahrensumstellungen, z. B. das auf Oxyfuel-Verfahren, die ggf. mit einem zusätzlichen Verbrauch an elektrischer Energie einhergehen, bleiben unberücksichtigt. Der tatsächliche Umfang von CCU in der Zementindustrie wird nicht quantifiziert.

Neben den Effizienzsteigerungen ist auch eine Transformation der Produktionstechnik hinsichtlich der Art der eingesetzten Energieträger unterstellt. So wird angenommen, dass in den Jahren 2030 und 2040 zunehmend weniger und im Jahr 2050 keine abfallstämmigen Ersatzbrennstoffe mehr in der Zementindustrie eingesetzt werden. Das bedeutet, dass im Jahr 2050 ohne Einsatz von abfallstämmigen Ersatzbrennstoffen mangels verfügbarer strombasierter Verfahren die thermische Energie aus erneuerbaren Brennstoffen, konkret erneuerbaren strombasierten Gas, erzeugt wird. In den Szenarien reduzieren sich die Ersatzbrennstoffe sukzessiv, so dass ab dem Jahr 2030 der Endenergiebedarf mehr und mehr durch gasförmige Brennstoffe (erst Erdgas, später erneuerbares Methan) gedeckt wird. Die Annahme, dass keine Ersatzbrennstoffe zur Verfügung stehen, kann man durchaus kritisch hinterfragen. Im Gesamtkontext der vorliegenden Studie und vor dem Hintergrund aktueller Überlegungen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft wird davon ausgegangen, dass sich das für die Zementindustrie zur Verfügung stehende Ersatzbrennstoffportfolio ändert. Dies könnte zum einen bedeuten, dass weniger Mengen für die Mitverbrennung zur Verfügung stehen und zum anderen die zur Verfügung stehenden Abfälle aufgrund von Stör- und Schadstoffen weniger für die Mitverbrennung in der Zementindustrie geeignet sind. Der gewählte Ansatz soll sicherstellen, dass der theoretische Mehrbedarf an erneuerbaren Energieträgern dieses relevanten Sektors mit erfasst wird. Eine weitergehende Substitution fossiler Brennstoffe im Transformationsprozess bis 2050 durch abfallstämmige Sekundärbrennstoffe als Maßnahme zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen wird damit nicht weiter betrachtet. Für den Übergangsprozess von heute hin zu einer nahezu treibhausgasneutralen Gesellschaft ist dies jedoch ggf. eine weitere Option, um die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

Vor dem Hintergrund des Kohleausstiegs wird der derzeitige Einsatz von Braunkohlestaub zunehmend durch Erdgas bzw. 2050 durch erneuerbares strombasiertes Gas kompensiert.

Entsprechend der Szenariencharakteristiken erfolgt die Transformation auch hier in GreenLate deutlich langsamer als in den anderen betrachteten Szenarien, so dass in GreenLate deutlich mehr (25,7 TWh) erneuerbares Gas benötigt wird als in den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme, welche im Jahr 2050 in etwa gleich große Mengen (8,8 bis 9,7 TWh) benötigen, siehe Abbildung 5-89.

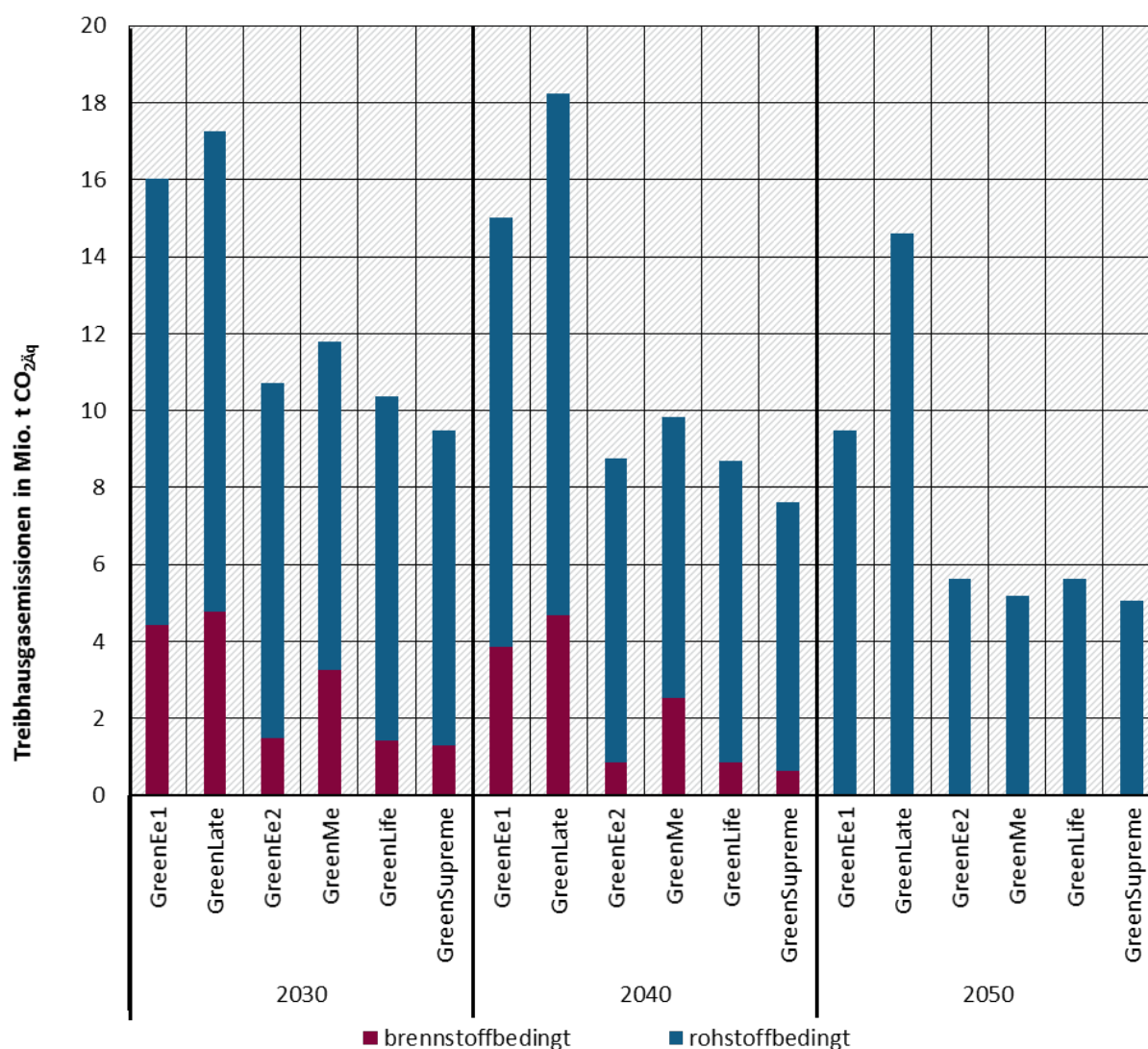
Außerdem zeigt Abbildung 5-89, dass in den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme der Strombedarf im Jahr 2050 in etwa gleich groß (3 bis 3,3 TWh) ist. In GreenEe1 ist dieser deutlich höher (5,6 TWh). In GreenLate ist der Strombedarf mit 2,4 TWh niedriger. Dies liegt zum einen daran, dass eine verlangsamte Umstellung auf direkt strombasierte Produktionstechniken, z. B. zur Herstellung alternativer Bindemittel, erfolgt, so dass sich dies in höheren Gasbedarfen 2050 widerspiegelt. Außerdem ist erkenntlich, dass bereits 2040 in GreenSupreme strombasiertes erneuerbares Gas in die allgemeine Gasversorgung gelangt und damit auch anteilig in die Anwendungsbereiche.

**Abbildung 5-89: Endenergieverbrauch der Zementindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie sie in Abbildung 5-90 dargestellt ist, resultiert sowohl aus der Produktionsentwicklung, etwaigen Verfahrensumstellungen, dem daraus resultierenden Endenergiebedarf und der Art der eingesetzten Energieträger. Die fossilen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen werden bis zum Jahr 2050 durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig vermieden. Die rohmaterialbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen können deutlich, aber in keinem Szenario auf null reduziert werden. Nach Abbildung 5-90 ergeben sich für die Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme im Jahr 2050 in etwa gleich große rohmaterialbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen (5 bis 5,6 Mio. t CO<sub>2</sub>), während sie für die Szenarien GreenEe1 (9,5 Mio. t) und insbesondere GreenLate (14,6 Mio. t) deutlich höher liegen. Entscheidende Faktoren für diese Unterschiede sind die zugrundeliegenden Annahmen zur Produktionsentwicklung sowie zum Anteil alternativer Bindemittel. Dies bedeutet eine Reduktion der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990 von mindestens 40 % (GreenLate) und maximal 80 % bei GreenSupreme. Die Vergleichsangaben für das Jahr 1990 wurden der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ entnommen (UBA, 2014c).



**Abbildung 5-90: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Zementindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Insgesamt ist bei der Umstrukturierung der Zementindustrie die heterogene Gemengelage möglicher Ansatzpunkte zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie die Wechselwirkungen mit Entwicklungen in der Stahlindustrie und nachgelagerter Bereiche zu berücksichtigen. Soweit es modelltechnisch möglich war, wurden diese Wechselwirkungen berücksichtigt. Konkret betrifft das die Transformation der Stahlindustrie und der Energiewirtschaft. Darüber hinaus wurden sowohl Ansätze für alle Bereiche der Wertschöpfungskette des Zementes bis hin zum Bauwerk und zum Recycling von Beton als auch die anspruchsvollen Ziele der Bundesregierung bei der Flächenneuersiegelung berücksichtigt. Die daraus resultierenden veränderten Bauaktivitäten sowie die Veränderungen auf die Ressource Fläche durch veränderte Aktivitäten beim Bergbau (Kies- und Sandgruben) sind modellendogen in die Ergebnisse eingeflossen.

Unberücksichtigt bleibt der energetische Mehraufwand für zusätzliche Maßnahmen im Kontext der Dekarbonisierung der Zementindustrie, z. B. CCU<sup>110</sup>.

<sup>110</sup> Berücksichtigung erfolgt in der Energieversorgung, da diese Bedarfe dem Umwandlungssektor und nicht einzelnen Branchen zu zuordnen ist.



### 5.5.6.2 Schlussfolgerungen

Die Green-Szenarien zeigen, dass unter optimistischen Annahmen und bei intensiver Forschung und Entwicklung und konsequenter Umsetzung die Treibhausgasemissionen deutlich, bis zu 80 % gegenüber 2010, reduziert werden können. Hierzu wird Forschungsbedarf insbesondere in folgenden Bereichen gesehen:

- ▶ Umstellung von Prozessen/Prozessschritten auf strombasierte Verfahren,
- ▶ Umstellung von Prozessen/Prozessschritten auf gasförmige Brennstoffe,
- ▶ Entwicklung alternativer Bindemittel mit geringerem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck,
- ▶ Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff als erneuerbaren Brennstoff,
- ▶ Untersuchungen zu den Einsatzmöglichkeiten alternativer Rohmaterialien mit geringerem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck sowie
- ▶ Entwicklung von Maßnahmen zur Dekarbonisierung entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

### 5.5.7 Kalkindustrie

Die wesentlichen Produkte der Kalkindustrie sind Branntkalk (CaO), der durch das Brennen von Kalkstein (CaCO<sub>3</sub>) entsteht, und das durch Zugabe von Wasser zum Branntkalk entstehende Kalkhydrat (Ca(OH)<sub>2</sub>). Ein wesentliches Einsatzgebiet von Branntkalk ist die Entschwefelung von Roheisen bei der Stahlerzeugung. Darüber hinaus wird Branntkalk bzw. der mit Wasser gelöschte Branntkalk in der Baustoffindustrie bei der Herstellung von Putzen und Mörteln sowie Kalksandsteinen verwendet. Ein drittes großes Anwendungsgebiet ist die Rauchgasentschwefelung, wie sie z. B. in Kraftwerken aber auch anderen Industrieanlagen durchgeführt wird.

Mit Emissionen in Höhe von etwas mehr als 7 Mio. t CO<sub>2</sub><sup>111</sup> gehört (DEHSt, 2019) die Kalkindustrie zu den größeren Treibhausgasemittenten im Industriebereich. Aufgrund der produktbedingt gewollten Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus den eingesetzten Rohstoffen steht die Branche hinsichtlich einer vollständigen Dekarbonisierung vor einer unmöglichen Herausforderung. Minderungsmöglichkeiten beziehen sich allein auf den Bereich der brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen. Eine Reduzierung der rohstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen kann allein durch einen Produktionsrückgang induziert werden.

#### 5.5.7.1 Entwicklung der Kalkindustrie in den Green-Szenarien

Allein vor diesem Hintergrund sind die Möglichkeiten zur Treibhausgasminderung in den Szenarien begrenzt. Aus heutiger Sicht stehen in der Kalkindustrie im Wesentlichen folgende Maßnahmen zur Minderung ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Verfügung (UBA, 2014c):

- ▶ Erhöhung der thermischen Energieeffizienz,
- ▶ Steigerung der elektrischen Energieeffizienz sowie
- ▶ weit(er)gehende Substitution fossiler Energieträger.

---

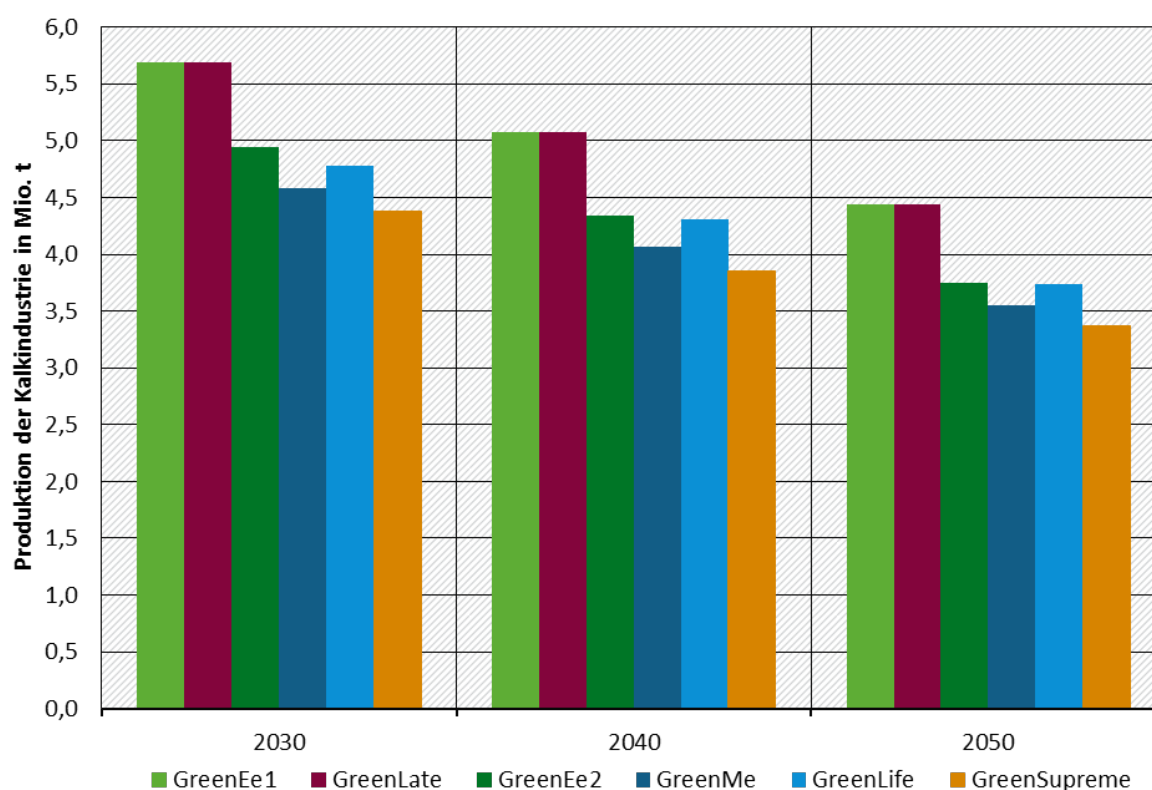
<sup>111</sup> Angaben für das Jahr 2017, ohne Berücksichtigung biogener CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Diese Maßnahmen wurden bereits in der UBA- Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c) betrachtet und werden nun im Wesentlichen für die betrachteten Szenarien übernommen. So wird ausgehend von 2010 bis 2050 eine sehr ambitionierte thermische Effizienzsteigerung angenommen. Für das Jahr 2050 wird gegenüber 2010 ein um 20 % niedrigerer spezifischer thermischer Endenergiebedarf unterstellt und ein linearer Pfad bis dahin angenommen. Zusätzlich wird der spezifische Strombedarf für die Branntkalkerzeugung bis zum Jahr 2050 linear um insgesamt 10 % reduziert. Wie bereits in (UBA, 2014c) bleibt der Energieeintrag über abfallstämmige Ersatzbrennstoffe unberücksichtigt. Dieser lag im Jahr 2010 bei etwa 1 % am thermischen Energieeinsatz.<sup>112</sup> Die Veränderungen bei der Verfügbarkeit geeigneter Ersatzbrennstoffe in der Zukunft werden synonym zur Zementindustrie unterstellt, siehe Kapitel 5.5.6.

In den Szenarien GreenEe1 und GreenLate wurde eine rückläufige Produktionsentwicklung unterstellt. Gegenüber 2010 erfolgt bis ins Jahr 2050 ein Rückgang um 31 %. Dies ist auf die Stilllegung von Kohlekraftwerken und Prozessumstellungen in der Stahlindustrie, die bisher große Abnehmer der Branntkalkproduktion in Deutschland sind, zurückzuführen. Die Dolomitmalkproduktion liegt konstant bei 0,32 Mio. t. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wurden die Produktionsmengen modellendogen ermittelt. Auch hier spiegeln sich die Veränderungen der Stahlindustrie und der Energieerzeugung wider. Zusätzlich werden die Auswirkungen des demografischen Wandels (geringerer Branntkalkverbrauch pro Kopf) und Veränderungen in der Art und Weise, wie und wieviel zukünftig gebaut wird, berücksichtigt. Der größte Produktionsrückgang gegenüber dem Jahr 2010 ist, wie in Abbildung 5-91 zu sehen ist, für das Szenario GreenSupreme zu verzeichnen (2030: -31 %, 2040: -39 %, 2050:-47 %). Wie in der Zementindustrie wirken hier die Materialeffizienzansätze aus GreenMe zur verstärkten Holzbauweise und die Bedarfsreduktionen im Wohnungsbau aus GreenLife gleichzeitig. Für die Szenarien GreenEe2 (2030: -22 %, 2040: -31 %, 2050: -41 %), GreenMe (2030: -27 %, 2040: -36 %, 2050: -44 %) und GreenLife (2030: -24 %, 2040: -32 %, 2050: -41 %) haben sich ebenfalls deutliche Produktionsrückgänge ergeben.

---

<sup>112</sup> Der aktuelle Anteil dürfte etwas höher aber immer noch im einstelligen Bereich liegen, so dass der Energieeinsatz aus Sekundärbrennstoffen in den Ausführungen weiterhin nicht berücksichtigt wird.

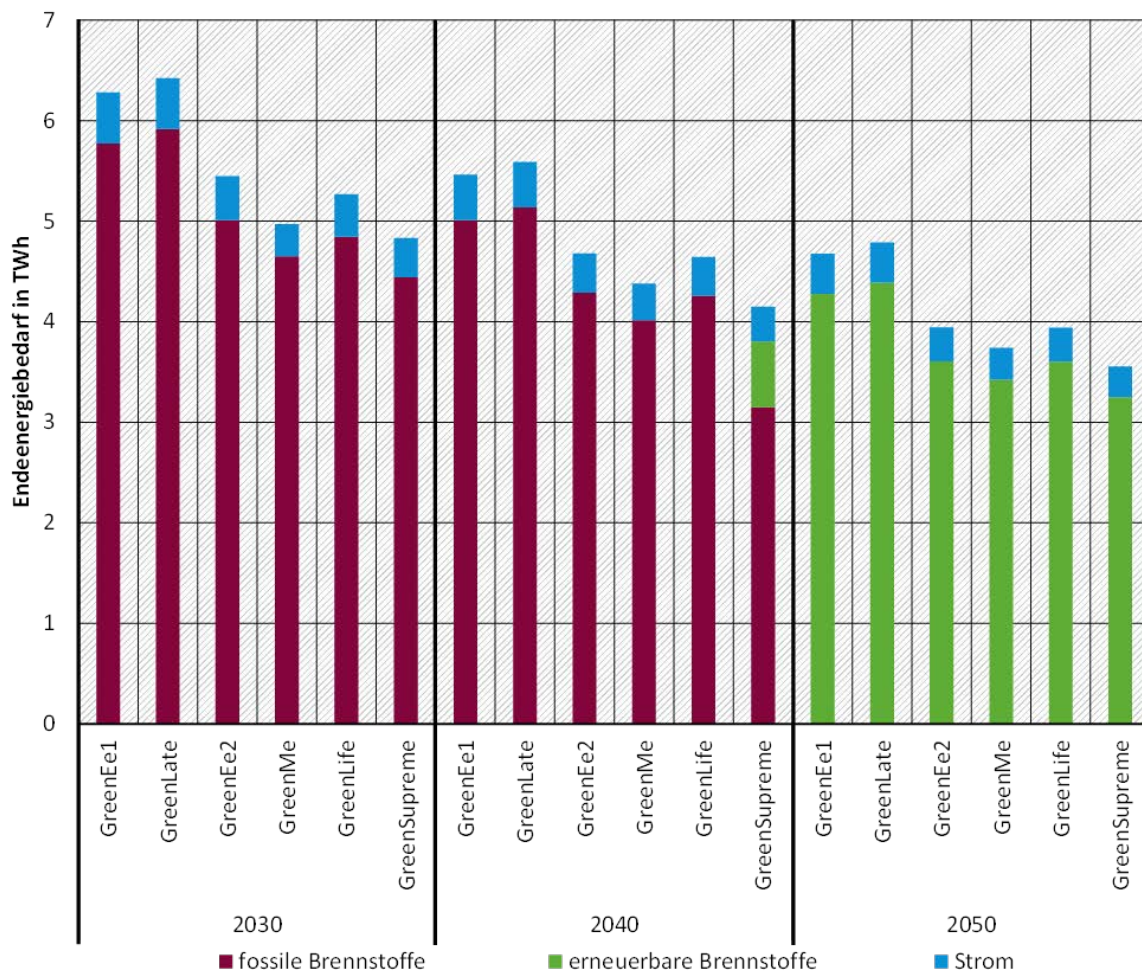
**Abbildung 5-91: Entwicklung der Produktionsmengen in der Kalkindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Ergänzend zu den obenstehenden Annahmen zur Effizienzsteigerung wird angenommen, dass ab dem Jahr 2030 die Hälfte des thermischen Endenergiebedarfs durch Erdgas gedeckt wird. Damit sollen im Wesentlichen die derzeit eingesetzten Regelbrennstoffe Braunkohlestaub, Koks und Kohle ersetzt werden und die weitergehende Umstellung auf gasbasierte Prozesse angestoßen werden. Für das Szenario GreenLate wird angenommen, dass diese Steigerung erst 10 Jahre verzögert, d. h. ab dem Jahr 2040 wirksam wird. Des Weiteren werden keine abfallstämmigen Ersatzbrennstoffe berücksichtigt, so dass mangels verfügbarer strombasierter Verfahren die thermische Energie aus erneuerbaren Gasen bereitgestellt wird.

All diese Annahmen sowie die oben dargestellte Produktionsmengenentwicklung haben Auswirkungen auf die benötigten Endenergiemengen. In allen Szenarien ergibt sich ein im Vergleich zum Basisjahr 2010 abnehmender Gesamtendenergiebedarf, siehe Abbildung 5-92<sup>113</sup>. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme ist der Bedarf an erneuerbarem Gas im Jahr 2050 in etwa gleich groß (3,3 bis 3,6 TWh), während er für die Szenarien GreenEe1 (4,28 TWh) und GreenLate (4,39 TWh) etwas höher liegt. Gleiches gilt für den Strombedarf, der für die Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme im Jahr 2050 in etwa gleich groß (0,3 bis 0,34 TWh) ist und für die Szenarien GreenEe1 und GreenLate etwas darüber liegt (0,4 TWh). In GreenSupreme gelangt bereits 2040 strombasiertes erneuerbares Gas in die allgemeine Gasversorgung, so dass bereits anteilig ein Teil des verwendeten Gases erneuerbar ist.

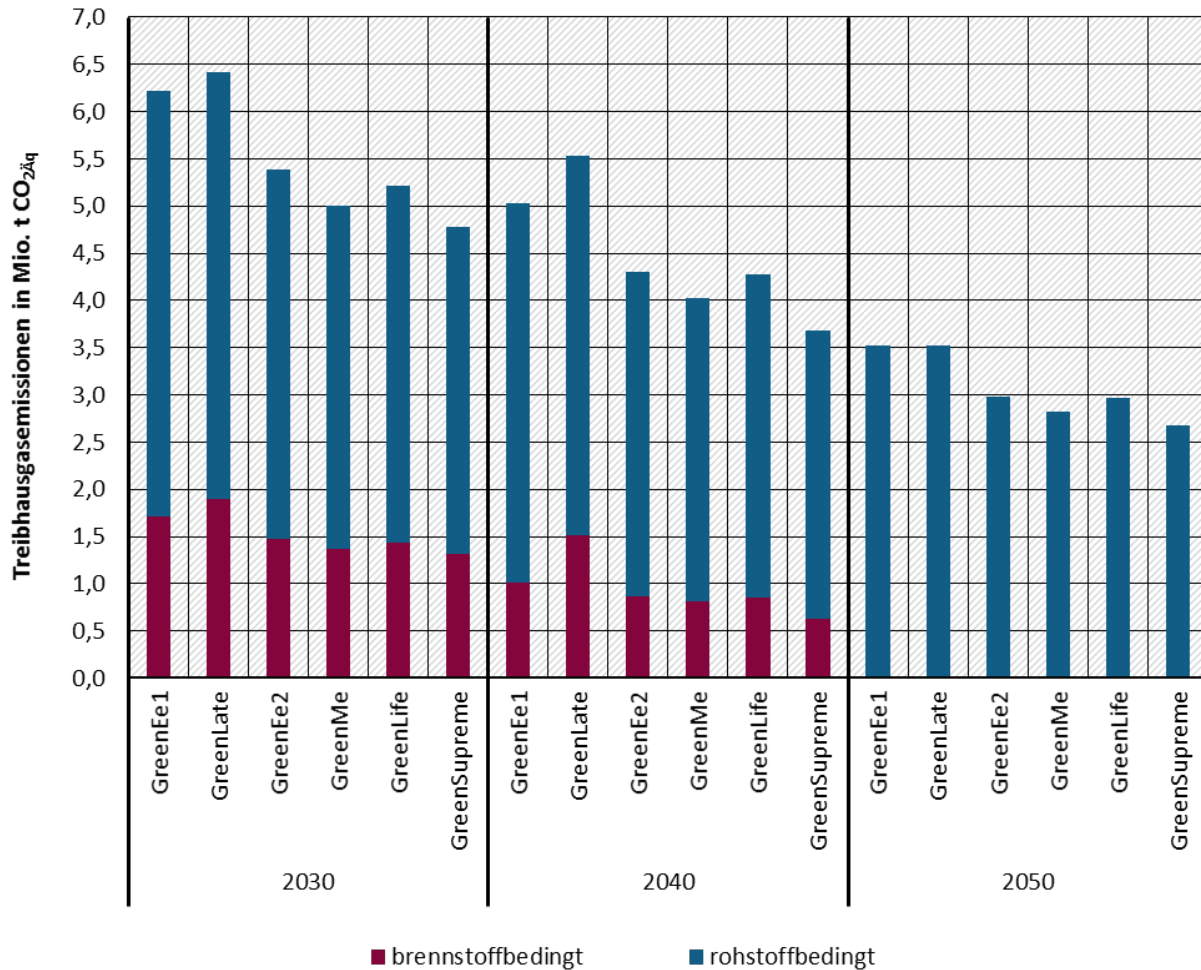
<sup>113</sup> Auch hier sei darauf verwiesen, dass CO<sub>2</sub> aus der Kalkindustrie für die Bereitstellung von strombasierten Energieträgern (PtG/PtL, siehe 5.2.1.1.1) genutzt werden kann (CCU). Der hierfür benötigte Energieaufwand (Stromverbrauch) wird nicht der Branche, sondern dem Umwandlungssektor der Energiewirtschaft zugeordnet. Der tatsächliche Umfang von CCU in der Kalkindustrie wird nicht quantifiziert.

**Abbildung 5-92: Endenergieverbrauch der Kalkindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die daraus resultierende Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, ist in Abbildung 5-93 dargestellt. Durch die vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien werden die fossilen energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig reduziert. Die rohmaterialbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen können aufgrund eines modellendogen ermittelten Produktionsrückgangs reduziert werden. Wie in Abbildung 5-93 ergeben sich für die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife im Jahr 2050 in etwa gleich große CO<sub>2</sub>-Emissionen (2,82 bis 2,97 Mio. t CO<sub>2</sub>), während sie für die Szenarien GreenEe1 und GreenLate (3,5 Mio. t) etwas höher liegen. Für das Szenario GreenSupreme konnte ein etwas verringerter rohmaterialbedingter CO<sub>2</sub>-Ausstoß ermittelt werden (2,68 Mio. t). Dies bedeutet eine Reduktion der direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990 von mindestens 60 % (GreenLate) und maximal 70 % bei GreenSupreme. Die Vergleichsangaben für das Jahr 1990 wurden der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ entnommen (UBA, 2014c).



**Abbildung 5-93: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Kalkindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Unberücksichtigt bleibt in den Ausführungen zur Kalkindustrie der energetische Mehraufwand für zusätzliche Maßnahmen im Kontext der Dekarbonisierung der Kalkindustrie, z. B. CCU.<sup>114</sup>

### 5.5.7.2 Schlussfolgerungen

Nach heutigem Kenntnisstand können die Treibhausgasemissionen im Wesentlichen durch die Substitution fossiler Energieträger reduziert und sogar vollständig vermieden werden. Für die Erreichung dieser ambitionierten Treibhausgasminderungen bzw. der aufgezeigten ambitionierten Umstrukturierung besteht Forschungsbedarf insbesondere in folgenden Bereichen:

- Umstellung von Prozessen auf strombasierte Verfahren,
- Forschung und Entwicklung von Verfahren mit geringeren rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen,
- Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff sowie

<sup>114</sup> Berücksichtigung erfolgt in der Energieversorgung, da diese Bedarfe dem Umwandlungssektor und nicht einzelnen Branchen zu zuordnen ist.

- Entwicklung von Maßnahmen zur Dekarbonisierung vor allem im Hinblick auf die Abscheidung und Nutzung von CO<sub>2</sub>.

### 5.5.8 Glasindustrie

In Deutschland wird eine Vielzahl unterschiedlicher Glasprodukte hergestellt und veredelt. Dazu gehören Behälterglas, für bspw. die Getränke- und Nahrungsmittelindustrie, Flachglas, für die Bauwirtschaft und Automobilindustrie, Gebrauchs- und Spezialglas, Kristall- und Wirtschaftsglas sowie Mineralfasern, für Dämmstoffe, und textile Glasfasern für die Textilindustrie herstellt.

Aufgrund der hohen benötigten Energiemengen von ca. 25 TWh/a gehört die Glasindustrie mit ihren zahlreichen Subsektoren in Deutschland zu den energieintensiven Industriezweigen. Neben den brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen treten jedoch auch rohstoffbedingte durch das Entsäuern der eingesetzten Karbonate auf.

#### 5.5.8.1 Entwicklung der Glasindustrie in den Green-Szenarien

Die Wesentlichen Treibhausgasminderungen in der Glasindustrie wurden bereits in (UBA, 2014c) beschrieben:

- Erhöhung des Scherbeneinsatzes (insbesondere in anderen Bereichen als Behälter- und Flachglas) sowie
- Erhöhung der Energieeffizienz durch Wärmerückgewinnung diffuser Abwärme aus den nachgelagerten Prozessen (z. B. Kühlbahnen) und Umstellung auf Elektrowannen.

Diese Maßnahmen werden nun im Wesentlichen für die betrachteten Szenarien übernommen. So wird ausgehend von 2010 bis 2050 eine sehr ambitionierte thermische Effizienzsteigerung, hauptsächlich durch die Umstellung auf Elektrowannen, angenommen. Für das Jahr 2050 wird gegenüber 2010 ein um 80 % niedrigerer spezifischer thermischer Endenergiebedarf unterstellt. Zusätzlich werden die prozessbedingten Emissionen durch die Steigerung des Scherbeneinsatzes reduziert.

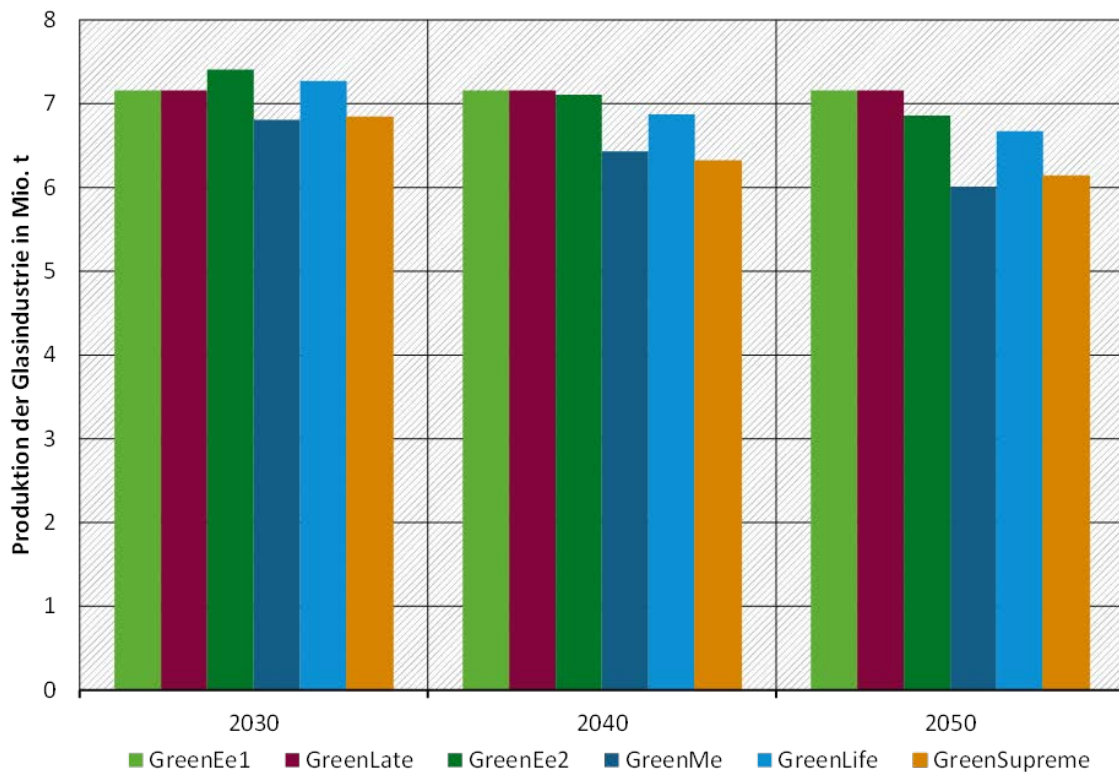
Neben den Effizienzsteigerungen ist eine Erneuerung des Anlagenparks erforderlich, bei welchem die Umstellung auf erneuerbare Energien im Fokus steht. Aus systemischer Energieeffizienz-sicht ist dabei eine direkte Nutzung von Strom zur Prozesswärmeversorgung anzustreben, siehe Kapitel 5.2.1. Daher wird angenommen, dass ab dem Jahr 2030 keine Öl-befeuerte Wannen mehr neu installiert werden, sondern eine Umstellung auf vollelektrische Wannen erfolgt. So sind in 2030 in allen Green-Szenarien bereits 10 % aller Wannen vollelektrisch beheizt. In 2040 sind es 30 % und 2050 werden alle Wannen vollelektrisch betrieben. Für das Szenario GreenLate wird abweichend angenommen, dass im Jahr 2030 noch keine Elektrowannen betrieben werden. Bis 2050 erfolgt eine Steigerung des Anteils an Elektrowannen auf 15 %. Die Annahmen für den Technologieumbau sind also entsprechend der Szenariencharakteristik deutlich verzögert.

Der Anteil des Scherbeneinsatzes bei der Glasherstellung, der heute bei ca. 40 % liegt, steigt in allen Green-Szenarien auf 45 % im Jahr 2030 auf 54 % in 2040 und auf 69 % in 2050. Bei GreenLate erfolgt wieder eine verzögerte Entwicklung und Umsetzung, so steigt der Scherbenanteil weniger ambitioniert von 45 % in 2030 auf 52 % in 2040 und 60 % in 2050.

In den Szenarien GreenEe1 und GreenLate wurde eine konstante Produktionsmenge unterstellt, so dass die Produktion identisch konstant bis 2050 bleibt. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wurden die Produktionsmengen modellendogen ermittelt und sinken in unterschiedlichem Ausmaß, entsprechend dem Konsumverhalten, Bauaktivitäten,

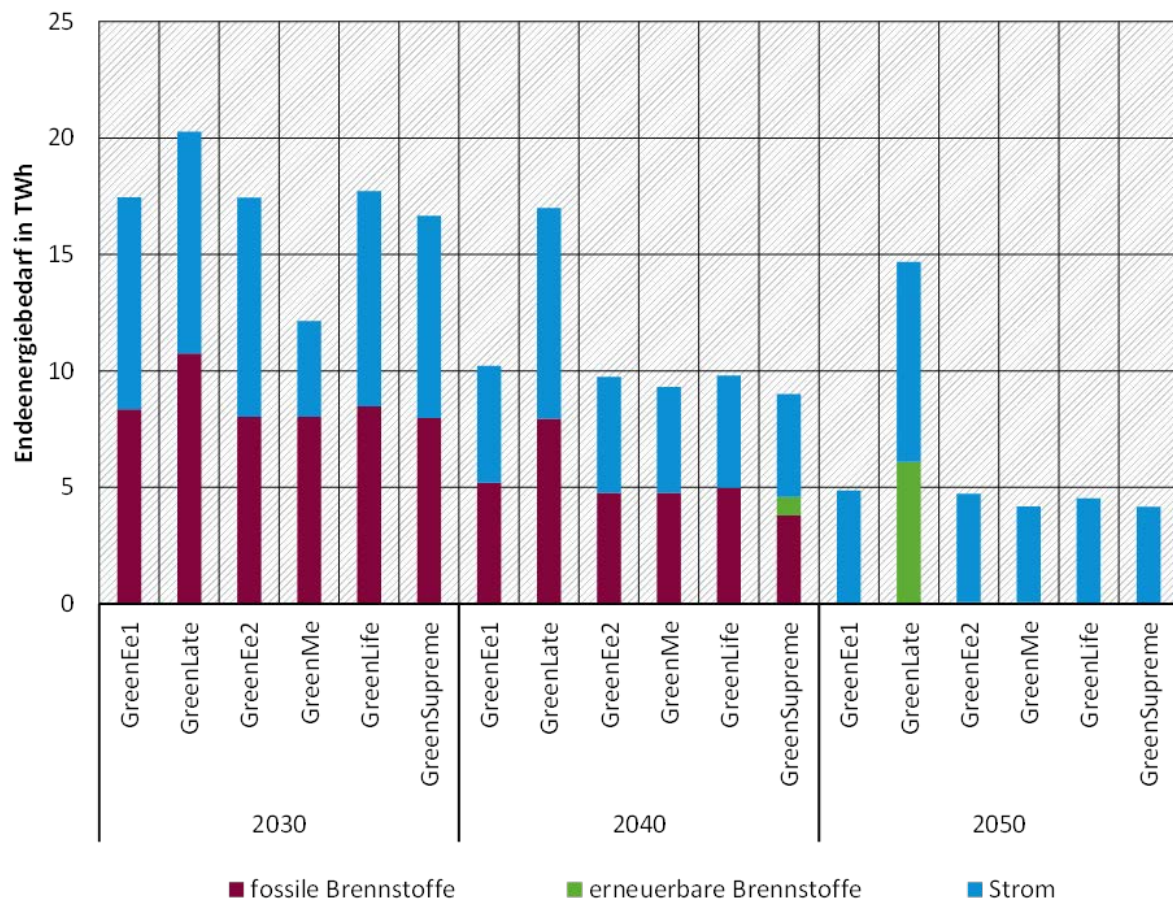
Änderungen der Automobilindustrie usw.. Der größte Produktionsrückgang gegenüber dem Jahr 2010 ist, wie in Abbildung 5-94 zu sehen ist, für das Szenario GreenSupreme zu verzeichnen (2030: 31 %, 2040: 39 %, 2050: 47 %), da hier sowohl die Annahmen zum veränderten Konsumverhalten aus GreenLife als auch die veränderten materialeffizienter Techniken, darunter auch veränderte Bauwirtschaft, aus GreenMe unterstellt werden. Für die Szenarien GreenEe2 (2030: +3 %, 2040: 1 %, 2050: 4 %), GreenMe (2030: -5 %, 2040: 10 %, 2050: 16 %) und GreenLife (2030: +2 %, 2040: 4 %, 2050: 7 %) haben sich weniger deutliche Produktionsrückgänge ergeben.

**Abbildung 5-94: Entwicklung der Produktionsmenge in der Glasindustrie in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

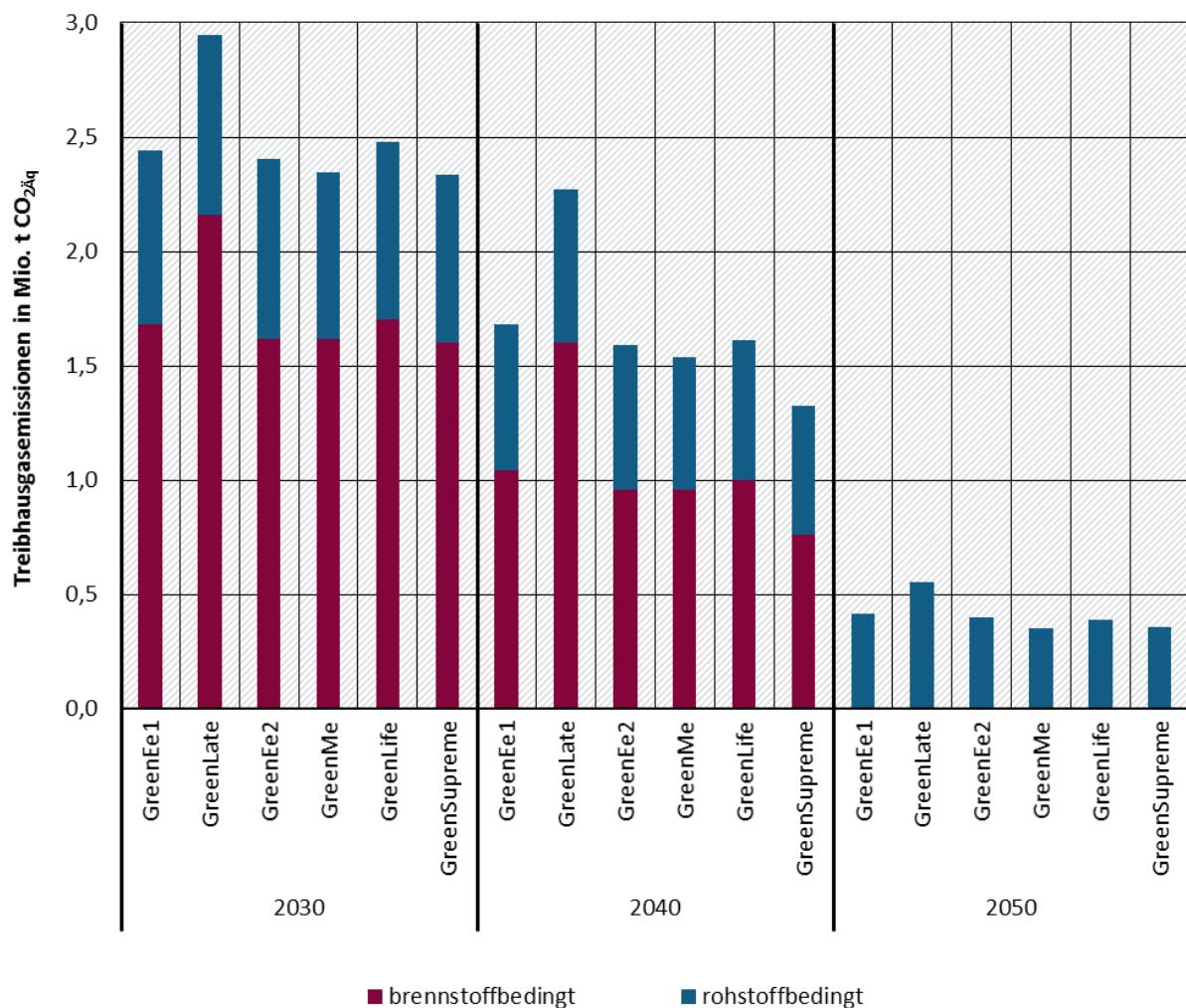
All diese Annahmen sowie die oben dargestellten sich ergebenden Produktionsmengenentwicklungen haben Auswirkungen auf die benötigten Endenergiemengen. In allen Szenarien ergibt sich ein im Vergleich zum Basisjahr 2010 abnehmender Gesamtendenergiebedarf, siehe Abbildung 5-95. In GreenEe1, GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme ist der Bedarf an Endenergie im Jahr 2050 in etwa gleich groß (<5 TWh) und wird vollständig durch Strom gedeckt, während er für das Szenario GreenLate etwa drei Mal so hoch ist und zu gut einem Drittel aus erneuerbaren Brennstoffen besteht. In GreenSupreme gelangt frühzeitig strombasiertes erneuerbares Gas in die allgemeine Gasversorgung, so dass bereits anteilig in 2040 ein Teil des verwendeten Gases erneuerbar ist.

**Abbildung 5-95: Endenergiebedarf der Glasindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Die daraus resultierende Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, ist in Abbildung 5-96 dargestellt. Durch die vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien werden die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig reduziert. Die rohmaterialbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen können aufgrund eines modellendogen ermittelten Produktionsrückgangs reduziert werden. Wie in Abbildung 5-96 zu erkennen ist, ergeben sich für die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife im Jahr 2050 in etwa gleich große CO<sub>2</sub>-Emissionen (580.000 bis 640.000 t CO<sub>2</sub>), während sie für das Szenario GreenLate etwas höher liegen (680.000 t CO<sub>2</sub>). Für das Szenario GreenSupreme konnte ein etwas verringerter rohmaterialbedingter CO<sub>2</sub>-Ausstoß ermittelt werden (560.000 t CO<sub>2</sub>), aufgrund der leicht geringeren Produktionsmenge. Die ermittelten CO<sub>2</sub>-Emissionen sind ausschließlich rohstoffbedingt, d. h. es handelt sich um CO<sub>2</sub>, dass beim Entsäuern der Karbonate entweicht. Die unterschiedlich hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen durch die unterschiedlichen Annahmen beim Scherbeneinsatz sowie der unterschiedlichen Entwicklung der Produktionszahlen.



**Abbildung 5-96: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Glasindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.8.2 Schlussfolgerungen

Die Green-Szenarien haben gezeigt, dass die energiebedingten Treibhausgasemissionen der Glasindustrie vollständig vermieden werden können. Die prozess- bzw. rohstoffbedingten Emissionen können nach heutigem Kenntnisstand nicht vollständig vermieden werden, da Karbonate für die Glasherstellung unerlässlich sind. Für die Erreichung dieser ambitionierten Treibhausgasminderungen bzw. der aufgezeigten ambitionierten Umstrukturierung besteht Forschungsbedarf insbesondere in folgenden Bereichen:

- ▶ Umstellung von Prozessen auf strombasierte Verfahren, insbesondere bei großen Glasschmelzwannen (>200 t Schmelzkapazität pro Tag) sowie
- ▶ Steigerung des Scherbeneinsatzes in anderen Bereichen als Behälter- und Flachglas (Detektionstechnik, ggf. Vorschmelz- oder Kompaktierungsverfahren).
- ▶ Entwicklung alternativer Werkstoffe, die keinen Karbonateinsatz erfordern, für die einzelnen Glasarten.

### 5.5.9 Papier- und Zellstoffindustrie

Deutschland werden ca. 3000 verschiedene Papiersorten produziert. Dabei gibt es folgende vier Hauptsortenbereiche:

- ▶ Graphische Papiere,
- ▶ Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke,
- ▶ Hygiene-Papiere sowie
- ▶ Papiere und Pappe für spezielle technische Verwendungszwecke.

In Deutschland beträgt die gesamte Produktion von Papier, Karton und Pappe etwa 23 Mio. t, davon entfielen 2018 % auf Verpackungspapiere, 34,2 % auf graphische Papiere, 6,2 % auf Spezialpapiere sowie auf 6,6 % Hygiene-Papiere (vdp, 2019).

Mit einem Endenergieverbrauch von etwa 10 % des Gesamtverbrauchs der Industrie gehört die Zellstoff- und Papierindustrie bisher zu den fünf energieintensiven Branchen in Deutschland. Etwa 84 % davon entfallen auf den Verbrauch von Brennstoffen und Fremdwärme, der Rest auf die Verwendung von Strom (UBA, 2014c).

Treibhausgasemissionen in der Zellstoff- und Papierindustrie sind ausschließlich energiebedingt, so dass nahe liegt, dass die Emissionen durch eine Umstellung auf erneuerbare Energien vollständig vermieden werden können.

#### 5.5.9.1 Entwicklung der Papier- und Zellstoffindustrie in den Green-Szenarien

Eine Minderung der energiebedingten THG-Emissionen ist durch unterschiedliche Maßnahmen möglich:

- ▶ Substitution der fossilen Energieträger durch Umstellung der Prozesswärmeerzeugung auf Strom und die prozessinterne Nutzung anfallender biogener Reststoffe, z. B. der Ablauge aus der Zellstoffkochung, Rinde und Holzabfällen sowie Faserschlämmen,
- ▶ Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Bereitstellung der Prozesswärme,
- ▶ Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von mechanischen Antrieben sowie
- ▶ weitere Erhöhung des Anteils an Altpapier als Faserstoff (um 10 %).

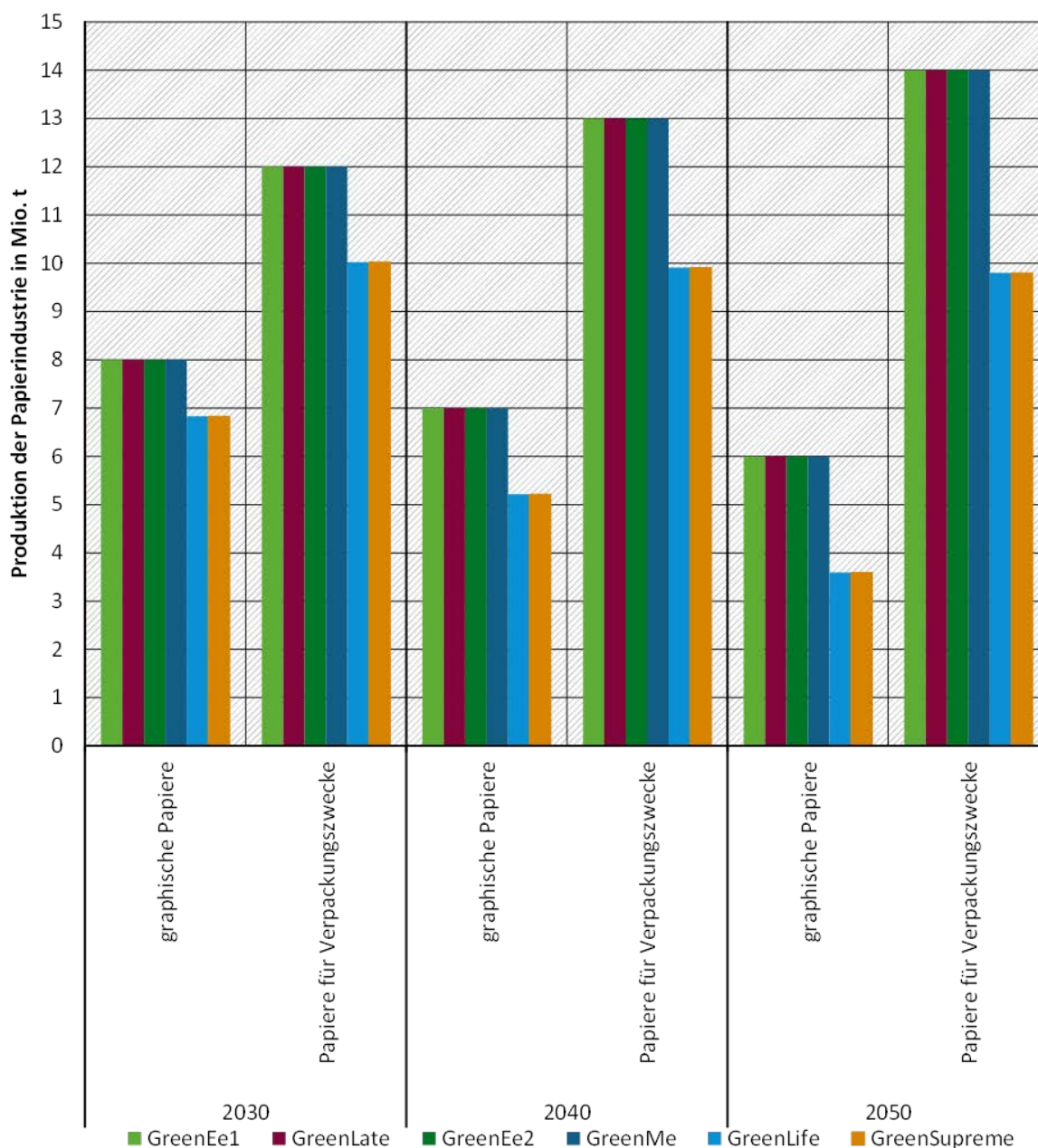
Papierfasern lassen sich ca. 6– bis 7-mal recyceln. Mit jedem Kreislauf nimmt die Qualität der Faser ab. Das bedeutet, dass für die Aufrechterhaltung des Papierkreislaufes ein kontinuierlicher Zufluss von Primärfasern in Höhe von 20 % erforderlich ist. Der Recyclinganteil der deutschen Papierindustrie lässt sich also nicht beliebig weit erhöhen, könnte aber noch um ca. 10 % ansteigen.

Es ist davon auszugehen, dass der Bedarf an graphischen Papieren aufgrund der zunehmenden Digitalisierung ehemaliger Printmedien wie z. B. Tageszeitungen zukünftig weiter zurückgehen wird. Dieser Rückgang wird aber durch einen steigenden Bedarf an Verpackungspapieren, u. a. durch den steigenden Internethandel, weitgehend kompensiert.

Für die Szenarien GreenEe1 und 2, GreenLate und GreenMe wird angenommen, dass sich die Gesamtproduktion an Papier bis 2050 auf etwa 24 Mio. t leicht erhöht. Weiterhin wird für alle Szenarien angenommen, dass sich das Verhältnis von Verpackungspapieren zu grafischen

Papieren von derzeit etwa 1:1 durch die weitergehende Digitalisierung ehemaliger Printmedien und den steigenden Verpackungsbedarf bis 2050 auf 2:1 verschiebt. Für GreenLife und GreenSupreme ergibt sich bis 2050 aufgrund des nachhaltigen und ressourcenschonenden Konsumverhaltens eine Änderung der Produktionsmengen auf etwa 17 Mio. t. Konkret wird angenommen, dass der Bedarf an Verpackungspapieren um 30 % und der an graphischen Papieren um 40 % niedriger liegt als in den anderen Green-Szenarien, wie in Abbildung 5-97 zu sehen ist.

**Abbildung 5-97: Entwicklung der Produktionsmenge an grafischen Papieren und Verpackungspapieren in den Green-Szenarien**



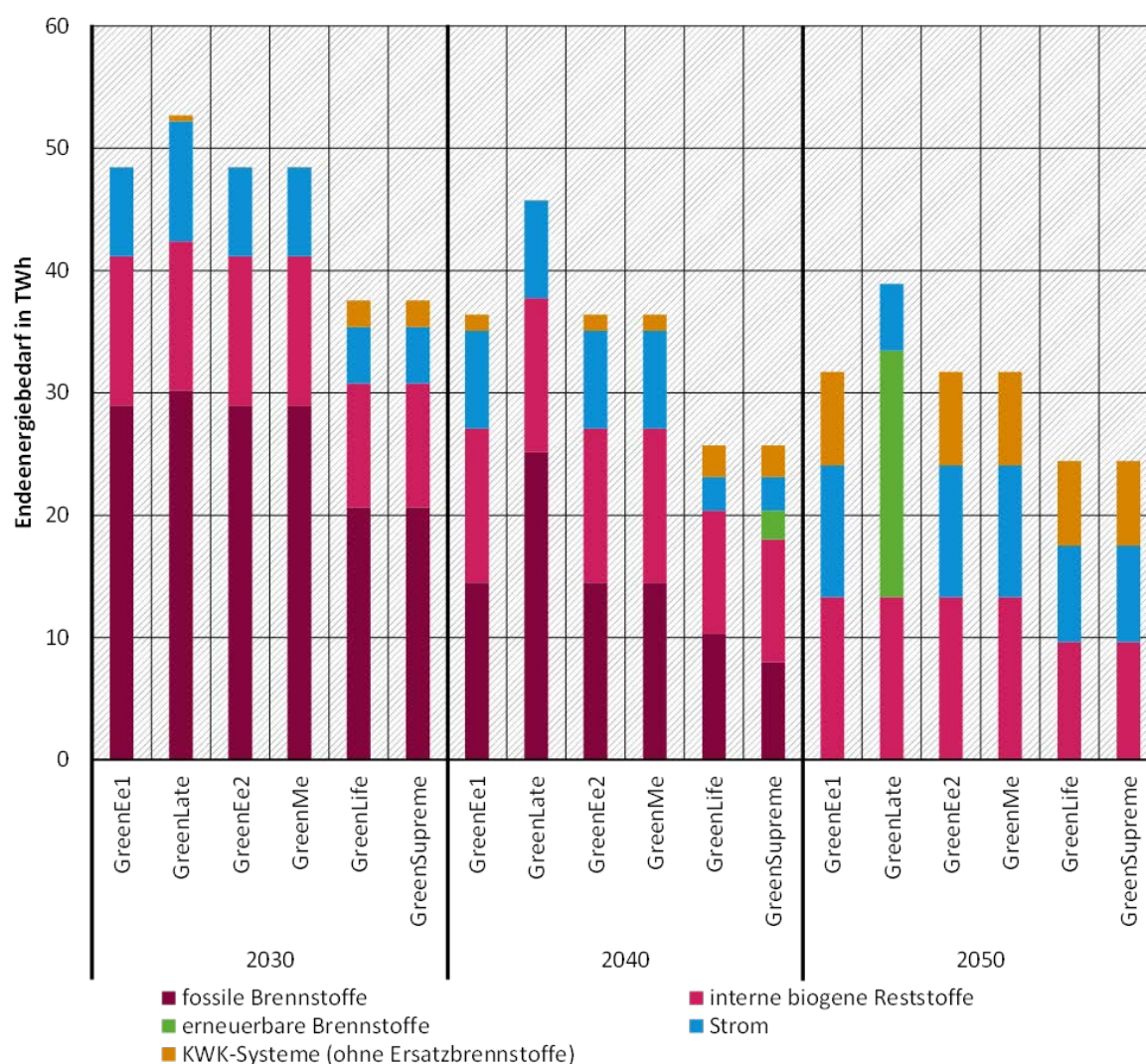
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Für die Szenarien GreenEe1, GreenEe2 sowie GreenMe wird davon ausgegangen, dass sich der spezifische Endenergiebedarf pro t Papier durch die Änderung im Produktmix, Effizienzgewinne sowie die Steigerung des Altpapieranteils bis 2050 auf 1,6 MWh/t nahezu halbiert und der



externe Endenergiebedarf bis 2050 vollständig durch Strom gedeckt wird. Dabei werden zuerst die noch mit Kohle betriebenen Feuerungen und nachfolgend auch von Erdgas auf Strom umgestellt. In GreenLate erfolgt die Effizienzverbesserung verzögert, so dass der spezifische Endenergiebedarf bis 2050 nur auf 1,9 MWh/t zurückgeht. Ebenso erfolgt die Umstellung auf Strom als Energieträger verzögert, so dass bis 2050 nur die Hälfte der Prozess auf vollelektrischen Verfahren basieren und die andere Hälfte auf konventionellen Prozesstechniken. Dementsprechend besteht in GreenLate auch in 2050 ein zudeckender Gasbedarf, welcher mittels erneuerbaren strombasierten Gases (PtG) treibhausgasneutral versorgt wird. Wie in Abbildung 5-98 erkennbar, ist der Endenergiebedarf in GreenLate damit etwa um ein Drittel höher als in GreenSupreme. Wie außerdem in Abbildung 5-98 sichtbar, wird in GreenSupreme 2040 die allgemeine Gasversorgung bereits mit erneuerbarem strombasiertem Gas versorgt, so dass anteilig auch treibhausgasneutrale Brennstoffe 2040 in der Papier- und Zellstoffindustrie genutzt werden. In den Szenarien GreenLife und GreenSupreme sinken aufgrund der nachfragebedingten Abnahme der Papierproduktion auch der Endenergiebedarf entsprechend stärker.

**Abbildung 5-98: Entwicklung der Energieverbräuche der Papierindustrie und der jeweiligen Anteile der**

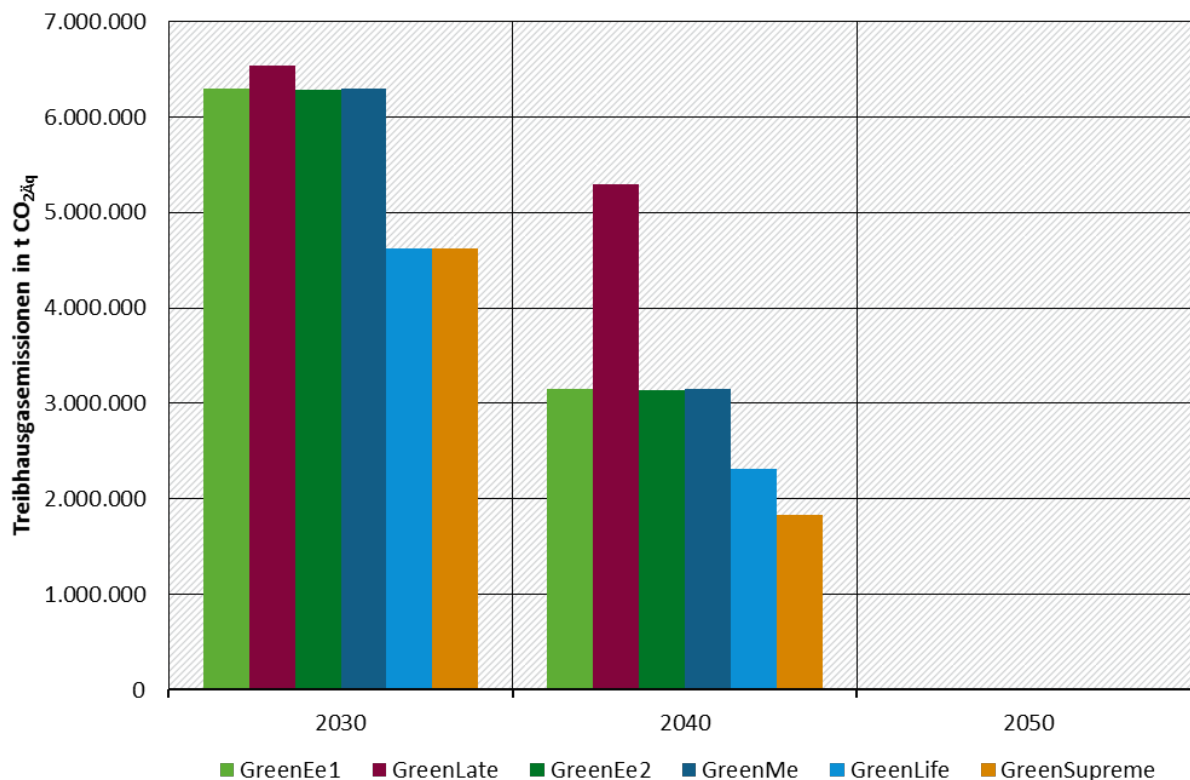


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)



Durch die vollständige Umstellung auf Strom bzw. auf erneuerbare Brennstoffe sowie im GreenLate Szenario auf erneuerbare Brennstoffe, sinken in allen Szenarien die Treibhausgasemissionen auf Null, wie in Abbildung 5-99 zu sehen ist.

**Abbildung 5-99: Entwicklung der THG-Emissionen der Papierindustrie bis 2050 in den betrachteten Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.9.2 Schlussfolgerungen

Alle Szenarien zeigen, dass durch Umstellung auf erneuerbare Energien die Treibhausgasemissionen in der Papierindustrie vollständig vermieden werden können. Dabei ist aus systemischer Sicht und vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung eine direkte Nutzung von Strom zur Prozesswärmeversorgung anzustreben und dabei die prozessinterne Nutzung aller anfallenden biogenen Reststoffe zu optimieren. Die technischen Voraussetzungen sind hierfür prinzipiell gegeben, es bedarf jedoch entsprechender Rahmenbedingungen, um die Umstrukturierung und Erneuerung der Produktionsanlagen wirtschaftlich zu gestalten.

Darüber hinaus sind alle Anstrengungen im Rahmen der Produktverantwortung erforderlich um geeignete Anreize zur Optimierung des Altpapierkreislaufes zu setzen, um den Frischfaserbedarf so gering wie technisch möglich zu halten.

### 5.5.10 Nahrungsmittelindustrie

Die Nahrungsmittelindustrie gehört mit mehr als 608.000 Beschäftigten in rund 6.100 Betrieben und einem Jahresumsatz von knapp 180 Mrd. Euro zu den größten Industriezweigen Deutschlands (BVE, 2019). Ziel ist die gesicherte Bereitstellung von ausreichend Lebensmitteln für die Bevölkerung. Der Gesamtbedarf an Lebensmitteln wird unter anderem über den notwendigen Energieinhalt („Kalorien“) und verschiedene Lebensstile bestimmt und ist einerseits an die Bevölkerungsentwicklung und andererseits an Im- und Exporte gekoppelt. In

den nachfolgenden Betrachtungen ist besonders die Wechselwirkung zum Bereich Landwirtschaft, der gesünderen Ernährung und veränderten Konsumverhalten hin zu regionaleren Produkten berücksichtigt, siehe Kapitel 5.7.

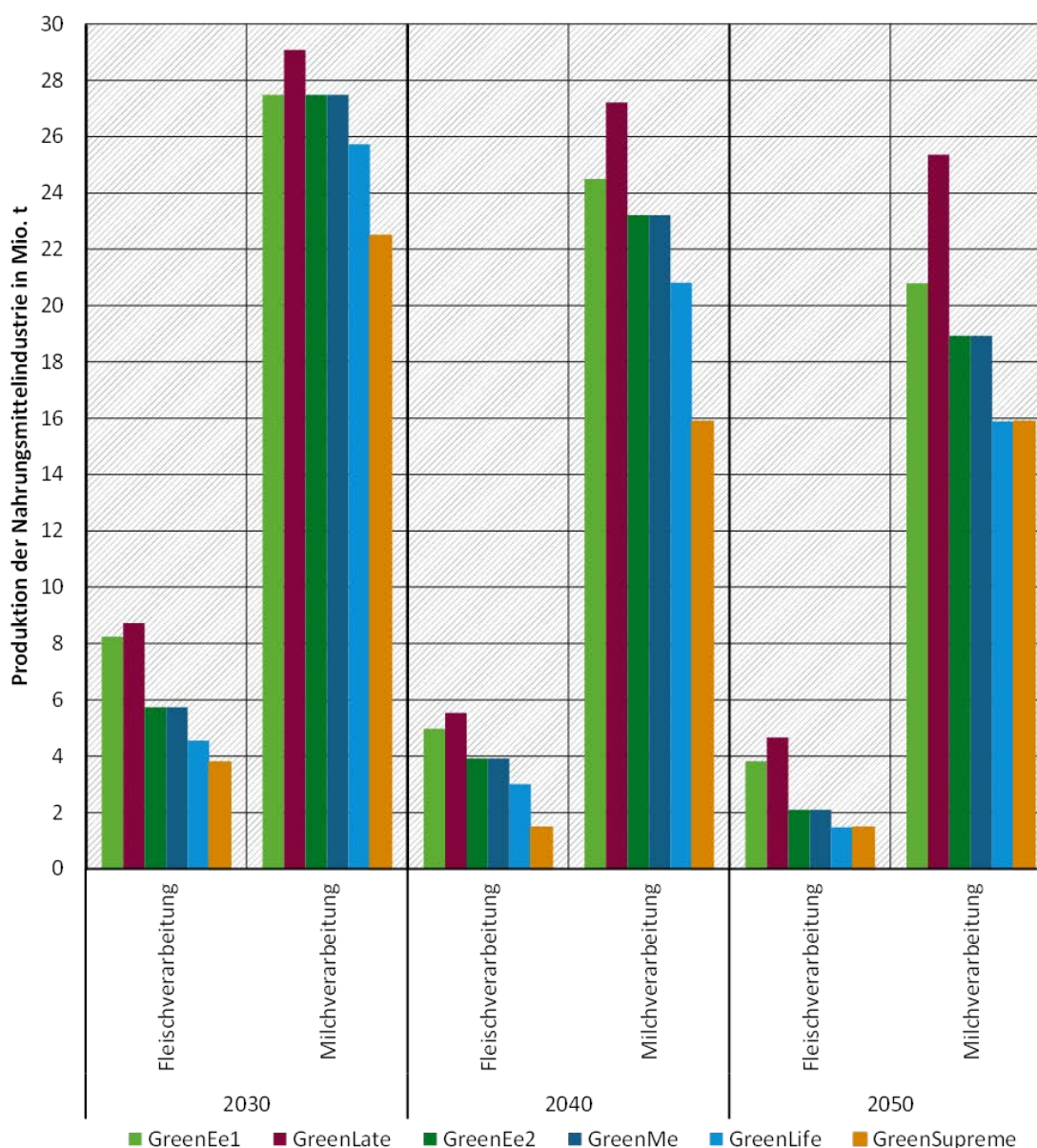
Die Nahrungsmittelindustrie wird in eine Vielzahl an Unterbranchen von A wie Alkohol bis Z wie Zucker unterteilt. Besonders energierelevante Prozesse sind das Erhitzen (garen, kochen, backen, trocknen etc.) und Kühlen.

#### **5.5.10.1 Entwicklung der Nahrungsmittelindustrie in den Green-Szenarien**

Die Treibhausgasemissionen der Nahrungsmittelindustrie sind ausschließlich energiebedingt, so dass folgende Ansätze zur THG-Minderung beitragen:

- ▶ Substitution der fossilen Energieträger, insbesondere durch die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom,
- ▶ Effizienzsteigerung in den Produktionsprozessen sowie
- ▶ Effizienzsteigerung durch konsequente Abwärmenutzung.

Vor dem Hintergrund der Heterogenität wurde in den Green-Szenarien vereinfachend pauschale Annahmen getroffen und die Nahrungsmittelindustrie als Gesamtes betrachtet. Es wird bspw. angenommen, dass für die gesamte Nahrungsmittelindustrie insbesondere bedingt durch den Export eine Produktionssteigerung um 0,7 % erfolgt. Aufgrund der detaillierten Betrachtung im Bereich Landwirtschaft werden die Unterbranchen Fleischverarbeitung und Milchverarbeitung gesondert ausgewiesen. In Abbildung 5-100 ist deren Entwicklung der Produktionsmengen dargestellt. Es ist erkenntlich, dass insbesondere in GreenLife und GreenSupreme ein erheblicher Produktionsrückgang erfolgt. Neben der unterstellten schnelleren Umstellung auf eine gesündere Ernährung als in den anderen Szenarien und dem veränderten Konsumverhalten hin zu nachhaltigen regionalen Produkten wirkt sich vor allem die Reduktion des Selbstversorgungsgrades, siehe Kapitel 5.7, auf die Produktionsmengen der Fleisch- und Milchverarbeitung aus.

**Abbildung 5-100: Entwicklung der Produktionsmenge in der Fleisch- und Milchverarbeitung in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

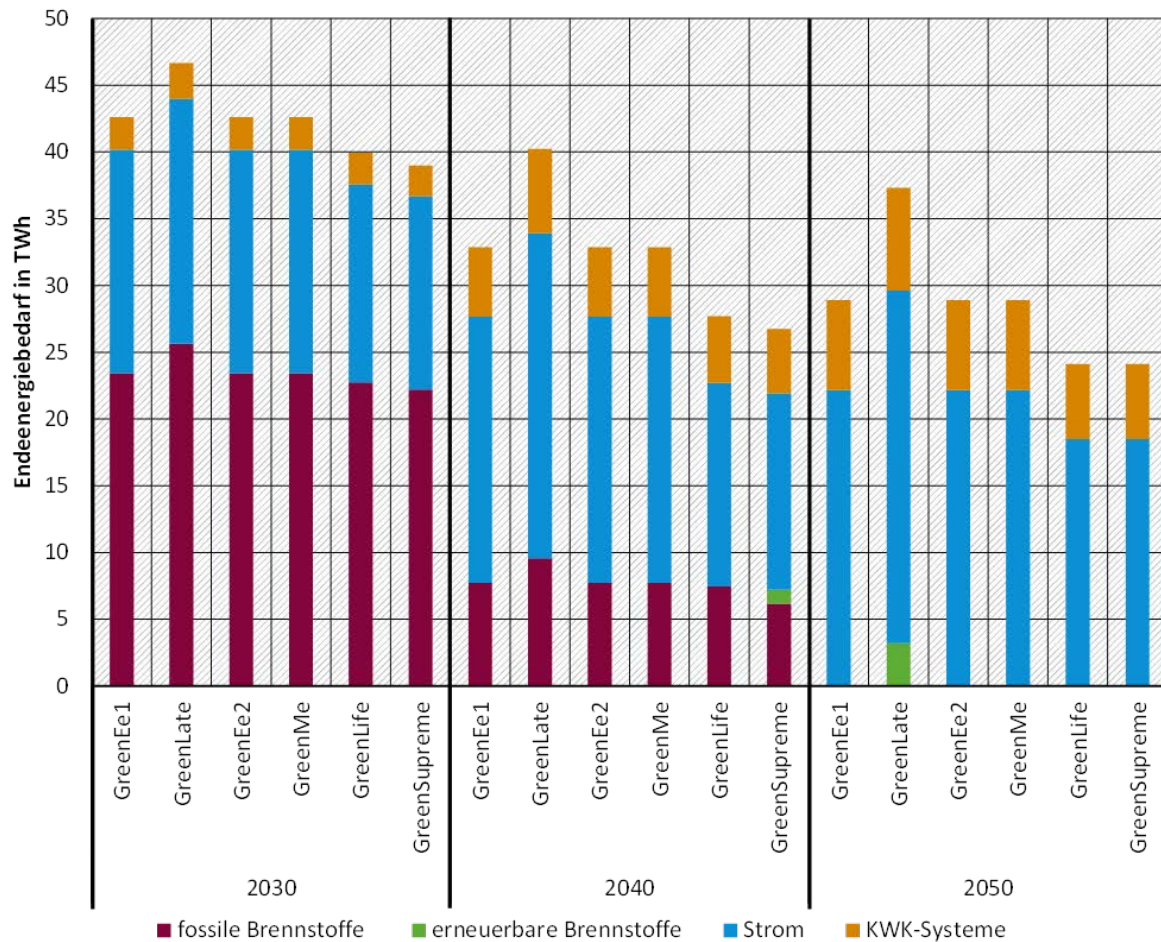
Da die THG-Emissionen ausschließlich energiebedingt verursacht werden, ist es grundsätzlich technisch möglich die Nahrungsmittelindustrie vollständig auf erneuerbaren Strom zur Prozesswärmeversorgung umzustellen und so sämtliche THG-Emissionen zu vermeiden. Diese Umstrukturierung der Produktionsanlagen wird in allen Green-Szenarien unterstellt. Entsprechend der Szenariencharakteristik erfolgt dies unterschiedlich schnell, so dass auch in dieser Branche in GreenLate die Modernisierung und Umstellung der Produktionsanlagen verspätet erfolgt. Darüber hinaus wird im GreenLate Szenario unterstellt, dass die Zucker- und Stärkeindustrie die Technikerneuerung bis 2050 nicht vollständig realisieren kann, so dass hier auch im Jahr 2050 noch erneuerbare Brennstoffe benötigt werden.

Ergänzend wirken Effizienzmaßnahmen, so dass der Endenergiebedarf der Nahrungsmittelindustrie bis 2050 sinkt, wie in Abbildung 5-101 dargestellt. Die Bereitstellung basiert 2050 im wesentlichen auf erneuerbaren Strom. Ausschließlich in GreenLate wird erneuerbares Gas zur Prozesswärmeversorgung eingesetzt. Darüber hinaus wird knapp ein



Viertel der Endenergiebedarfe durch leitungsgebundene Wärmeversorgung bereitgestellt. Dies ist Prozesswärme im Temperaturbereich 100 bis 500 °C, welche mit Wärme aus KWK-Systemen versorgt wird.

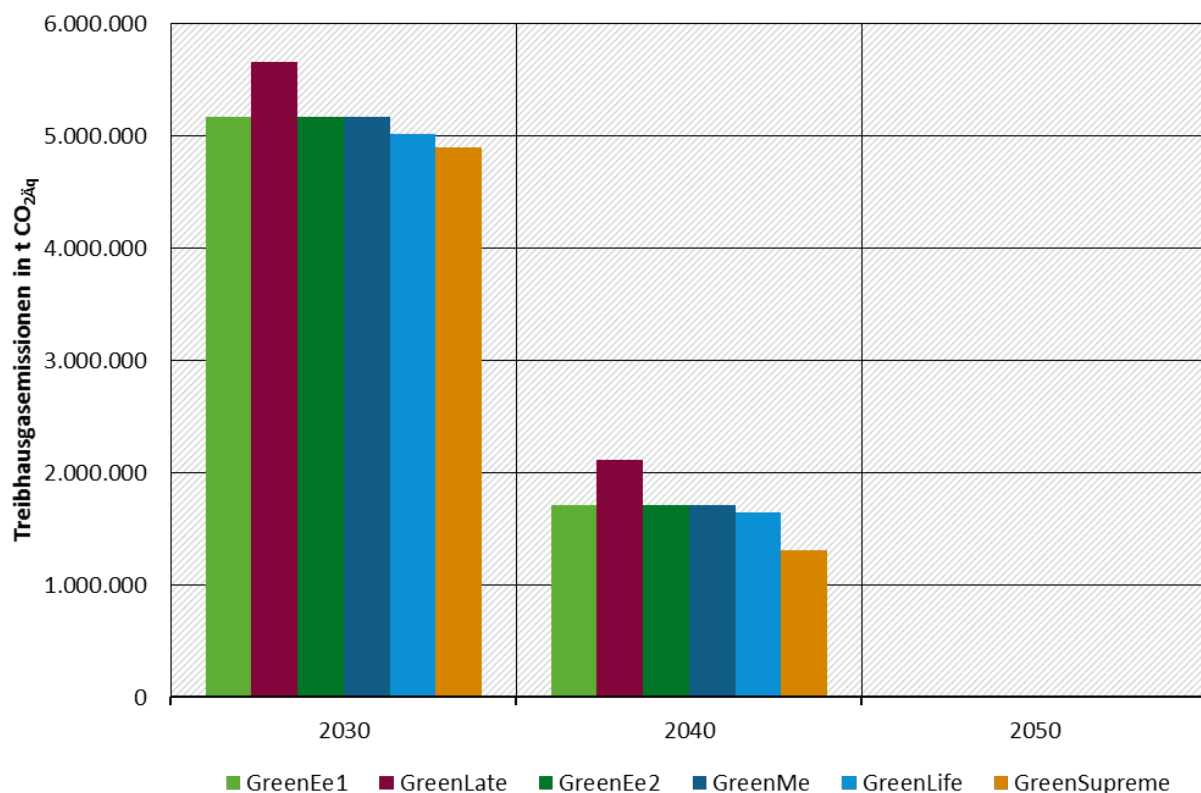
**Abbildung 5-101: Entwicklung des Endenergiebedarfs in der Nahrungsmittelindustrie in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Durch die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien sinken in allen Szenarien die Treibhausgasemissionen auf Null, wie in Abbildung 5-102 zu sehen ist.



**Abbildung 5-102: Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Nahrungsmittelindustrie in den Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.10.2 Schlussfolgerungen

Die Green-Szenarien zeigen, dass durch Umstellung auf erneuerbare Energien die Treibhausgasemissionen in der Nahrungsmittelindustrie vollständig vermieden werden können. Dabei ist aus systemischer Sicht und vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung eine direkte Nutzung von Strom zur Prozesswärme- und Prozesskälteversorgung anzustreben. Die technischen Voraussetzungen sind hierfür prinzipiell gegeben, es bedarf jedoch entsprechender Rahmenbedingungen, um die Umstrukturierung und Erneuerung der Produktionsanlagen wirtschaftlich zu gestalten. Unter den beschriebenen Randbedingungen kann in allen berechneten Szenarien das Ziel erreicht werden, die Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Null zu reduzieren.

### 5.5.11 Sonstige Branchen

Die sonstigen Branchen in Industrie und verarbeitenden Gewerbe sind sehr heterogen, beispielsweise sind hier die Textilindustrie, die Möbelindustrie oder die Pharmaindustrie enthalten. Zudem liegen nicht für alle Teilbranchen verlässliche Produktionsstatistiken vor. Aus diesem Grund können in den Green-Szenarien nur pauschale Annahmen getroffen werden.

#### 5.5.11.1 Entwicklung der sonstigen Branchen in den Green-Szenarien

Für die sonstigen Industriebranchen wird für alle Green-Szenarien außer GreenLate eine pauschale Effizienzsteigerung angenommen, so dass der Endenergieverbrauch bis 2050 auf ca. 60,2 TWh/a gesenkt wird. In GreenLate werden entsprechend der Szenariencharakteristik geringere Effizienzsteigerungen unterstellt, so dass der Endenergiebedarf sich bis 2050 nur auf rund 100 TWh reduziert. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme

wird pauschal eine proportionale Änderung der Produktion unterstellt. Diese ergibt sich aus der Summe der Produktionsänderungen der oben detaillierter betrachteten Branchen<sup>115</sup> in den Jahren 2030, 2040 und 2050 im Vergleich zu den Produktionsdaten aus dem Jahr 2010.

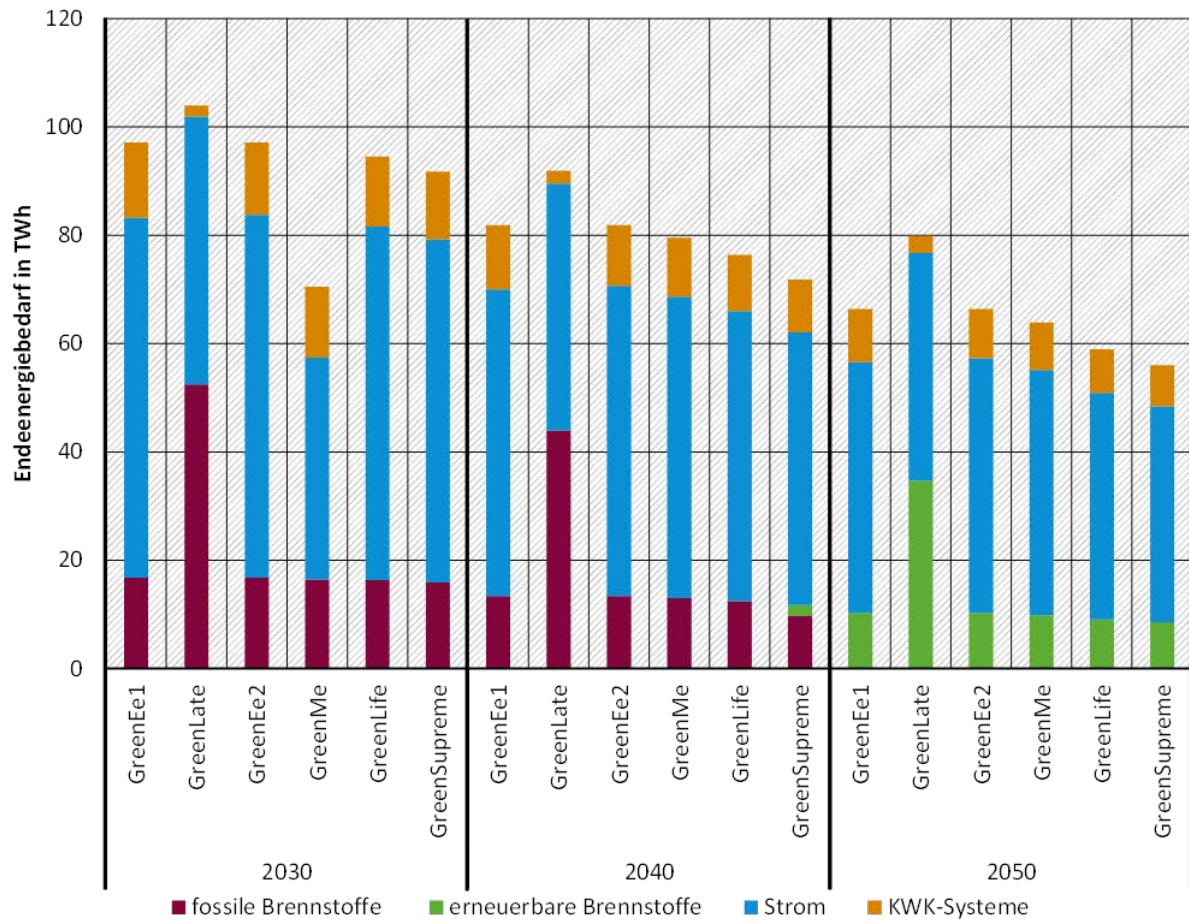
In den sonstigen Branchen sind folgende Minderungsansätze möglich:

- ▶ Substitution der fossilen Energieträger durch Umstellung der Prozesswärmeerzeugung auf Strom,
- ▶ Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Bereitstellung der Prozesswärme sowie
- ▶ Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von mechanischen Antrieben.

In den Green-Szenarien wird unterstellt, dass zur Minderung der systemischen Verluste zur Prozesswärmeversorgung vor allem Power to Heat-Techniken zum Einsatz kommen. Brennstoffe, wie erneuerbares Gas, sollte nur dort eingesetzt werden, wo technisch eine Substitution der fossilen Energien nicht durch Strom möglich ist. Aufgrund der Heterogenität der Branchen konnte jedoch keine exakte Quantifizierung vorgenommen werden, vielmehr erfolgte nur eine grobe Näherung. Dabei wurde angenommen, dass der Anteil am Endenergiebedarf für die Bereitstellung von Prozesswärme bis 2050 unverändert 25 % beträgt. Gleichfalls wurde unterstellt, dass sich die Verteilung des Prozesswärmebedarfs auf die verschiedenen Temperaturniveaus bis 2050 nicht wesentlich ändert und dementsprechend rund 77 % des Endenergieverbrauchs für Prozesswärme im Temperaturbereich bis 500 °C benötigt wird. Für Prozesswärmeanwendungen unter 500 °C wird in allen Szenarien unterstellt, dass hierfür kein erneuerbares Gas benötigt wird. Es wird unterstellt, dass die Prozesswärme direkt mit erneuerbarem Strom oder leitungsgebunden über KWK-Systeme erfolgt. Über 500 °C verbleibt in allen Szenarien ein Anteil an Prozesswärme, welchen den Einsatz von Brennstoffen erfordert. In den Green-Szenarien reduziert sich der Bedarf an Gas auf rund 10 TWh in 2050, was etwa 15 % des Endenergiebedarfes und 21 % des Prozesswärmebedarfes darstellen, siehe Abbildung 5-103. Im Szenario GreenLate ergibt sich entsprechend der verspäteten Umstellung von Prozesstechniken und geringeren Effizienzsteigerungen ein ca. 3-mal höherer Bedarf an Brennstoffen. Im Jahr 2050 liegt dieser bei knapp 35 TWh, so dass knapp 60 % der Prozesswärme brennstoffbasiert bereitgestellt wird.

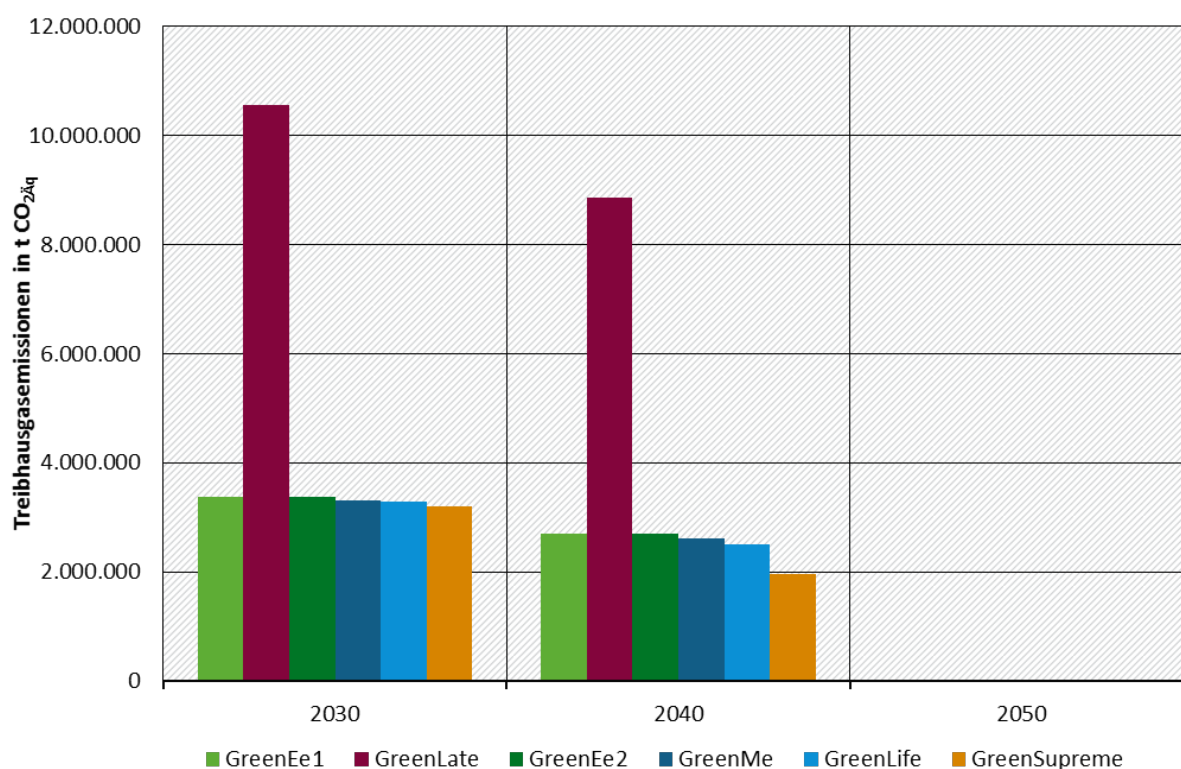
---

<sup>115</sup> Nicht mit einbezogen wird die Entwicklung der chemischen Industrie.

**Abbildung 5-103: Entwicklung des Endenergiebedarfs der sonstigen Branchen in den Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Aufgrund der geringen Effizienzsteigerung und der verspäteten Umstellung der Prozesswärmetechniken weist GreenLate in 2030 und 2040 noch deutlich mehr Treibhausgasemissionen auf als die anderen Green-Szenarien, siehe Abbildung 5-104. Bis 2050 basiert die Energieversorgung in allen Green-Szenarien vollständig auf erneuerbaren Energien und es werden keine Treibhausgasemissionen mehr verursacht.

**Abbildung 5-104: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der sonstigen Branchen in den Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.11.2 Schlussfolgerungen

In den sonstigen Branchen können die Treibhausgasemissionen bis 2050 in allen Szenarien vollständig reduziert werden. Die wichtigsten Maßnahmen sind auch hier die Technologieumstellung auf Strom und dort wo dies technisch nicht möglich ist, auf erneuerbares Gas, welche durch finanzielle Anreize flankiert werden sollte. Zusätzlich tragen Energieeffizienzsteigerungen in der Produktion zu einer Reduktion des Gesamtenergieverbrauches bei und sollten über Marktanreizprogramme unterstützt werden. Vor dem Hintergrund der Heterogenität und teilweise komplexen Prozesstechniken besteht Forschungsbedarf in wieweit Brennstoffe tatsächlich benötigt werden oder ob auch hier die Substitution der fossilen Energien vollständig durch erneuerbaren Strom erfolgen kann.

## 5.5.12 Sonstige industrielle Emissionsquellen

### 5.5.12.1 Lösemittel und anderen Produktverwendungen

Zu den Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktverwendungen zählen Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen aus der Anwendung chemischer Produkte in Industrie, Handwerk und privaten Haushalten. Sie untergliedern sich in die Anwendung von Farben und Lacken, die Entfettung sowie chemische Reinigung, die Herstellung und Anwendung chemischer Produkte und in andere Anwendungen von Lösemitteln.

Von den flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) ist nur Methan ein Treibhausgas im Sinne der Klimarahmenkonvention. Die Emissionen aller anderen organischen Verbindungen ohne Methan, zusammengefasst unter dem Begriff „flüchtige organische Verbindungen ohne Methan“ (NMVOC), sind nicht unmittelbar treibhausrelevant. Sie können aber über photochemische Prozesse in der Atmosphäre zur Bildung des sekundären Treibhausgases Ozon beitragen oder



an der Bildung von treibhausrelevanten Aerosolen beteiligt sein. Daher bezeichnet man die Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan als „indirekte“ Treibhausgase, und die Quellgruppe müsste korrekt „Indirektes CO<sub>2</sub> aus NMVOC-Emissionen aus dem Bereich Lösemittel und andere Produktverwendung“ heißen.

In die Quellgruppe „Andere Anwendungen von Lösemitteln“ sind folgende Anwendungen oder Aktivitäten einbezogen: Behandlung von Glas- und Mineralwolle, Druckindustrie (Druckanwendungen), Extraktion von Ölen und Fetten, Anwendung von Klebstoffen und Haftmaterialien, Anwendung von Holzschutzmitteln, Anwendung von Unterbodenschutz und Fahrzeugkonservierung, Häusliche Verwendung von Lösemitteln (ohne Farben und Lacke), Entwachsen von Fahrzeugen, Herstellung von pharmazeutischen Produkten, Häusliche Verwendung von pharmazeutischen Produkten sowie Sonstige.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass einige flüchtige organische Verbindungen ohne Methan sowohl als Lösemittel als auch als chemische Reaktionskomponente eingesetzt werden. NMVOC (genauer: Stoffe oder Mengenanteile von Stoffen oder Produkten), die als chemische Reaktionskomponente eingesetzt werden, werden hier nicht betrachtet.

Die Emissionen von NMVOC aus der Anwendung von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Produkten tragen mit knapp 1.200.000 t CO<sub>2</sub>Aq im Jahr 2017 (UBA, 2019b) zu 0,13 % an den deutschen Treibhausgasemissionen bei. Seit 1990 sind die NMVOC-Emissionen dieser Quellgruppe insgesamt um fast 50 % zurückgegangen, wobei ein Großteil dieser Minderungen nach 1999 erfolgte. Zu diesem Minderungserfolg trugen insbesondere ordnungsrechtliche Regelungen wie die „Chemikalienrechtliche Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) durch Beschränkung des Inverkehrbringens lösemittelhaltiger Farben und Lacke“ (Lösemittelhaltige Farben- und Lack-Verordnung – ChemVOCFarbV), die 31. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz („Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen – 31. BImSchV“) und die 2. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz („Verordnung über Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen halogenierten organischen Verbindungen – 2. BImSchV“) sowie die TA Luft bei. Aber auch das deutsche Umweltzeichen „Blauer Engel“, in dessen Rahmen unter anderem lösemittelarme Lacke, Wandfarben oder Klebstoffe ausgezeichnet werden, hat daran einen wichtigen Anteil.

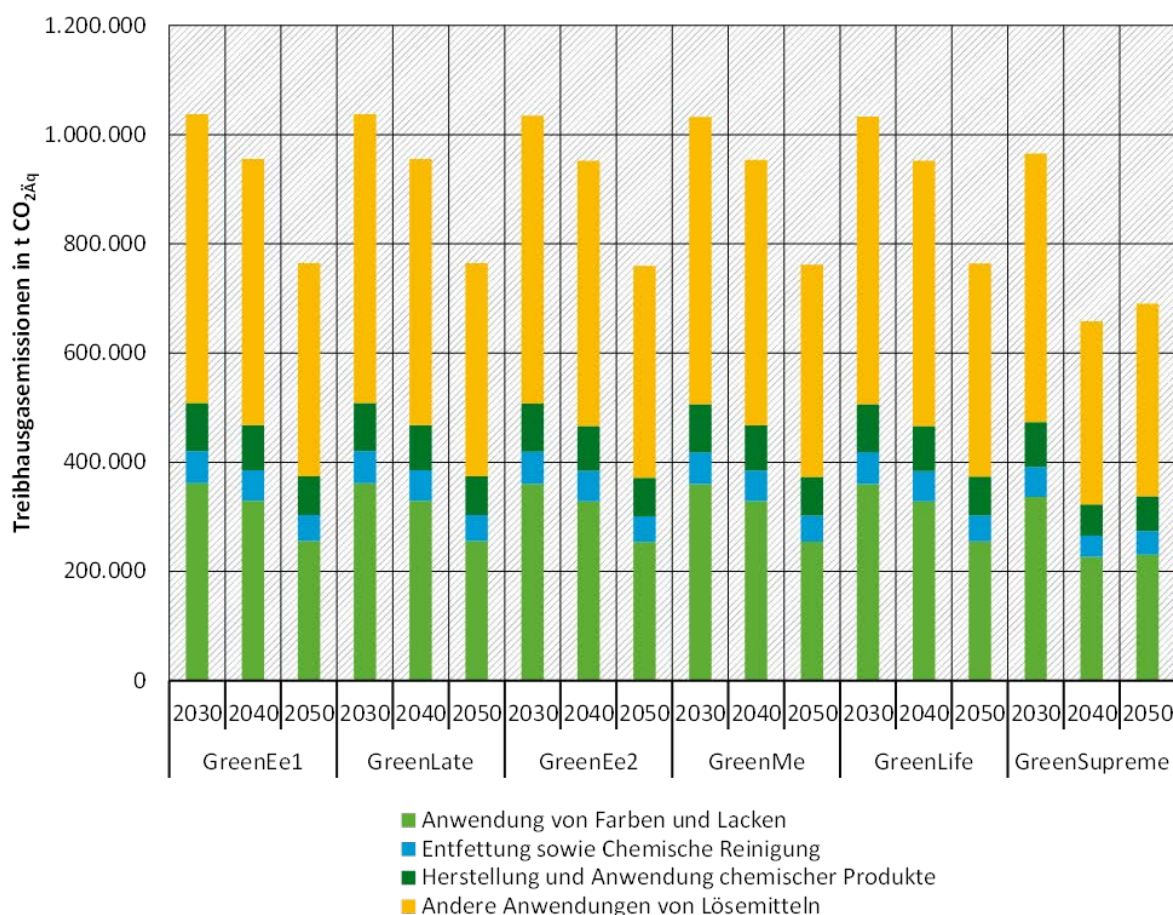
Um bis zum Jahr 2050 weitere Minderungen der Emissionen zu erreichen, sind Maßnahmen erforderlich, die weit über die derzeit geltenden gesetzlichen Regelungen hinausgehen. Wesentliche Schritte, die bereits in der UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c) diskutiert wurden, dies sind produkt- und prozessbezogene Maßnahmen wie insbesondere der Ersatz von lösemittelhaltigen Rezepturen durch lösemittelarme oder -freie Produkte in allen vier Quellgruppen. Dazu zählen beispielsweise:

- ▶ die Begrenzung des VOC-Gehalts von Aerosolverpackungen,
- ▶ die Begrenzung des VOC-Gehalts von Lacken und Farben in bisher noch ungeregelten Anwendungsbereichen,
- ▶ weitere Minderungen des VOC-Einsatzes bei Druckfarben und bei Prozessen in der Druckindustrie,
- ▶ der vermehrte Einsatz von treibhausgasneutralen Lösemitteln aus nachwachsenden Rohstoffen oder aus Abfällen und Reststoffen, beispielsweise von regenerativ erzeugtem Methan oder Bioethanol sowie

- eine höhere Steigerung der Effizienz beim Einsatz von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Produkten.

Diese Maßnahmen sind weitestgehend in den Green-Szenarien unterstellt. Es erfolgt keine Differenzierung innerhalb der Green-Szenarien. Entstehende Unterschiede resultieren aus unterschiedlichen Annahmen in vorgelagerten Bereichen (Produktion und Nachfrage). Die sich ergebende Unterschiede sind aber mit etwa 75.000 t CO<sub>2Äq</sub> bis zum Jahr 2050 gering. In Abbildung 5-105 sind die resultierenden Treibhausgasemissionen dargestellt. Die größten Emissionsminderungen in allen Szenarien werden bei der Anwendung von Farben und Lacken sowie den sonstigen Anwendungen von Lösemitteln erreicht. Die Anwendung von Farben und Lacken, welche im Jahr 2010 noch verantwortlich für Emissionen von 540.000 t CO<sub>2Äq</sub> waren, werden in allen weiteren Szenarien bis zum Jahr 2050 um 53 % auf etwa 260.000 t CO<sub>2Äq</sub> gemindert. Im GreenSupreme-Szenario sogar um 57 % auf 230.000 t CO<sub>2Äq</sub>. Bei den sonstigen Anwendungen ist der Verlauf ähnlich. Lagen die Emissionen im Jahr 2010 noch bei fast 775.000 t CO<sub>2Äq</sub>, so zeigen alle Szenarien eine Minderung um fast 50 % auf. In GreenSupreme wird eine Minderung um 55 % auf etwa 350.000 t CO<sub>2Äq</sub> erreicht.

**Abbildung 5-105: Entwicklung der NMVOC-Emissionen aus der Verwendung von Lösemitteln und anderen Produktverwendungen in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (UBA, 2019b) und (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.5.12.2 Fluorierte Treibhausgase

Zu den fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) zählen teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW), vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) und Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>). Auch wenn der Anteil der F-Gas-Emissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen

vergleichsweise gering ist, kommt F-Gasen eine besondere Bedeutung zu, da sie in der Regel bewusst für ihren Einsatz produziert werden.

Die Anwendungsbereiche für F-Gase sind vielfältig. Grundsätzlich kann zwischen dem Einsatz in überwiegend geschlossenen Kreisläufen (z. B. als Kältemittel), in offenen Anwendungen (z. B. als Treibgas) und als Prozessgas (z. B. bei der Halbleiterherstellung) unterschieden werden. Die wesentlichen Anwendungsbereiche von F-Gasen sind:

- ▶ als Schutz- und Reinigungsgas in der Aluminium- und Magnesiumindustrie,
- ▶ bei der Produktion fluorierter Treibhausgase (einschließlich chemischer Vorprodukte),
- ▶ als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlage und -geräten sowie Wärmepumpen,
- ▶ als Treibmittel bei der Herstellung von Dämm- und Schaumstoffen,
- ▶ als Treibgas in Aerosolen,
- ▶ als Lösemittel,
- ▶ als Feuerlöschmittel,
- ▶ als Ätzgas in der Halbleiterproduktion,
- ▶ als Isolier- und Löschgas in elektrischen Betriebsmitteln,
- ▶ als Isoliergas in Sonstigen SF<sub>6</sub>-Anwendungen.

In nahezu allen Anwendungsbereichen von F-Gasen stehen heute halogenfreie Alternativen zur Verfügung, die nur ein geringes Treibhauspotential aufweisen oder nicht klimawirksam sind. Die bedeutendsten Ersatzstoffe sind: Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, Wasser, Stickstoff, Luft und „Vakuum“. Alle genannten Stoffe sind relevant für die Kälte- und Klimatechnik, einige für die Schaumstoff- und Aerosolindustrie sowie als Feuerlösch- und Lösemittel. Der Einsatz von treibhausgasarmen Ersatzstoffen erfordert meist Verfahrensänderungen bis hin zur Entwicklung neuer Anlagen und Techniken. Damit ist häufig ein technischer Fortschritt verbunden, der Energieeinsparungen mit sich bringt oder zusätzliche Leistungen des Gerätes oder der Anlage ermöglicht.

Um bis zum Jahr 2050 wesentliche Substitutionen von F-Gasen und Minderungen der F-Gas-Emissionen zu erreichen, sind zahlreiche Maßnahmen zu ergreifen, die bereits heute technisch möglich sind und teilweise bereits wirken. Diese Maßnahmen gehen über derzeit geltende gesetzliche Regelungen, wie zum Beispiel die europäische F-Gas-Verordnung (EP & Rat der Europäischen Union, 2014), hinaus. Die wichtigsten Maßnahmen, die bereits in der UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014c) betrachtet wurden, sind:

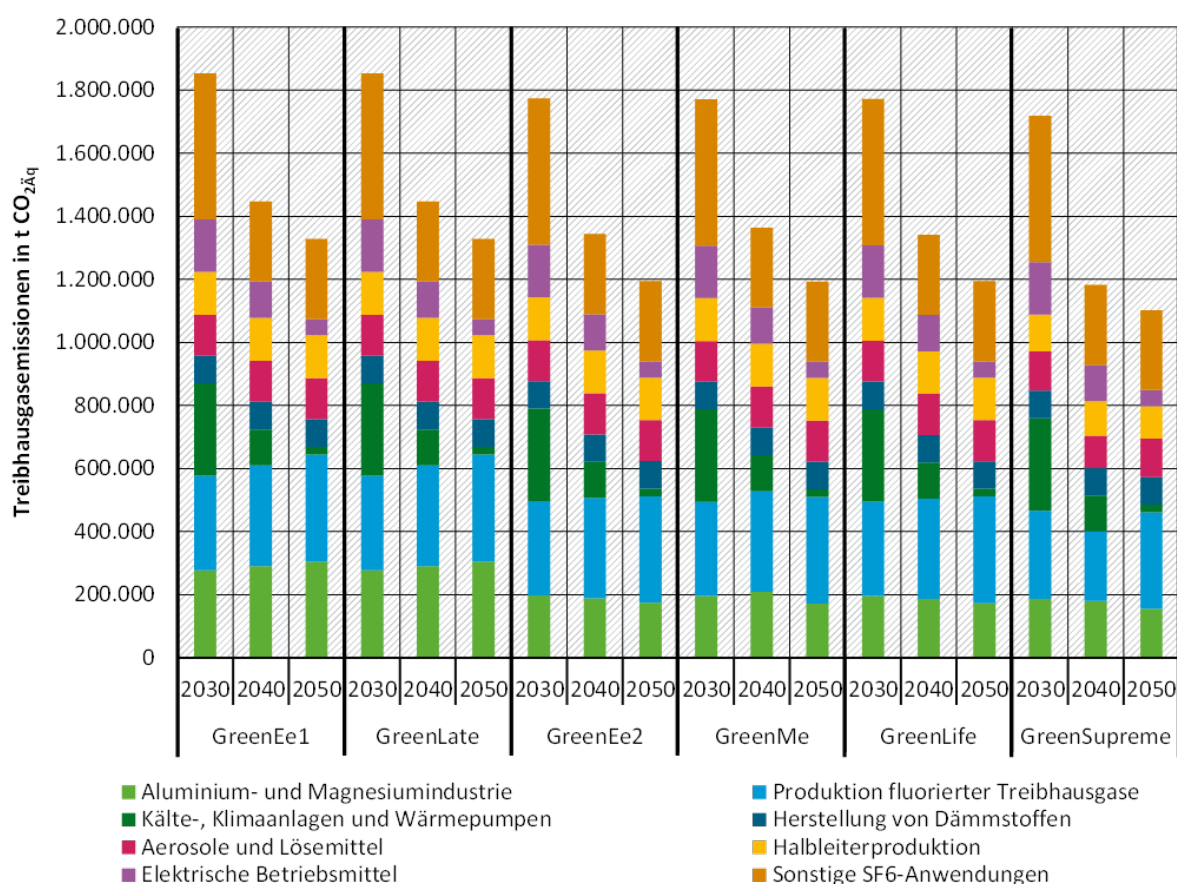
- ▶ der ausschließliche Einsatz natürlicher Kältemittel in allen stationären Kälte- und Klimaanlage sowie Wärmepumpen,
- ▶ die Substitution von HFKW durch Kältemittel mit einem Treibhauspotential unter 150 in allen mobilen Klimaanlage,
- ▶ ein nahezu vollständiger Verzicht auf den Einsatz von F-Gasen bei der Herstellung von Dämmstoffen und bei Montageschäumen,



- ▶ ein Verzicht auf den Einsatz von HFKW in neuen Feuerlöschanlagen,
- ▶ eine Verdoppelung des Marktanteils an Pulverinhalatoren und vergleichbaren HFKW-freien Systemen bis 2020 bei den medizinischen Dosieraerosolen sowie
- ▶ der Ersatz von SF<sub>6</sub> durch alternative Isoliermedien in elektrischen Betriebsmitteln ab 2020.

Die Umsetzung dieser Maßnahmen wird in allen Green-Szenarien unterstellt, so dass die Emissionen fluorierter Treibhausgase bis zum Jahr 2050 erheblich gesenkt werden, siehe Abbildung 5-106. Ausgehend von 14,3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq im Jahr 2010 (UBA, 2017a) können Werte zwischen 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq im GreenEe1-Szenario und GreenLate-Szenario und 1,1 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq im GreenSupreme-Szenario erreicht werden. Dies entspricht einer Emissionsminderung von bis zu 92 %.

**Abbildung 5-106: Entwicklung der Emissionen fluorierter Treibhausgase in den Green-Szenarien**



Hinweis: Zu den Emissionen aus „Sonstige SF<sub>6</sub>-Anwendungen“ zählen Emissionen aus Schallschutzfenstern, Teilchenbeschleunigern, Reifen, Schuhen, der Produktion optischer Glasfasern, der Anwendung als Feuerlöschmittel, dem Einsatz beim Schweißen und der militärischen Anwendung.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Abbildung 5-106 zeigt deutlich, dass die größten Emissionsminderungen in den Anwendungsbereichen Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen, elektrische Betriebsmittel und Sonstige SF<sub>6</sub>-Anwendungen erreicht werden können. Die Emissionen der Kälte- und Klimatechnik, die im Jahr 2010 mit 8,8 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq die Quelle für 62 % der gesamten F-Gas-Emissionen waren, können bis 2050 auf 0,02 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq gemindert werden. Bei Sonstige SF<sub>6</sub>-Anwendungen, dem Sektor mit den zweithöchsten F-Gas-Emissionen im Jahr 2010, sinken die Emissionen bis 2050 um 92 % auf 0,25 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq.



Erkennbar ist auch, dass es keine Unterschiede zwischen GreenEe1 und GreenLate gibt aufgrund der identischen exogenen Vorgabe zur Nachfrage und damit in den Produktionsbereichen. Die aus den unterschiedlichen Entwicklungen der Produktionsbereiche und Nachfrage sich ergebenden Unterschiede zwischen den Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife sind vernachlässigbar gering. Mit dem GreenSupreme-Szenario können die höchsten Emissionsminderungen erzielt werden, mit GreenEe1 und GreenLate die niedrigsten. Die Unterschiede sind aber mit 0,2 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> vergleichsweise gering.

### 5.5.12.3 Schlussfolgerungen

Die Green-Szenarien zeigen, dass unter optimistischen Annahmen und konsequenter Umsetzung die Treibhausgasemissionen aus sonstigen industriellen Emissionsquellen im Vergleich zum Jahr 2010 deutlich - um bis zu 56 % bei flüchtigen organischen Verbindungen und bis zu 92 % bei den fluorierten Treibhausgasen - reduziert werden können.

Bei den flüchtigen organischen Verbindungen könnten die Minderungserfolge der getroffenen Annahmen in den Green-Szenarien auf den ersten Blick nicht als bedeutend und die Berechnung daher als eher konservativ angesehen werden. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Die getroffenen Annahmen reichen weit über heute bereits realisierbare oder für die nahe Zukunft absehbare Maßnahmen hinaus. Es ist davon auszugehen, dass klimaneutrale nachwachsende Rohstoffe als Ausgangsstoffe bei der chemischen Synthese von Lösemitteln für Produkte erheblich an Bedeutung gewinnen. Damit verbunden ist ein entsprechender Minderverbrauch an fossilen Rohstoffen. Zudem ist ein tiefgreifender Wandel der Lebensstile – insbesondere im Bereich der privaten Haushalte – notwendig, um die Ziele zu erreichen.

Die Substitution von F-Gasen ist in nahezu allen Bereichen schon heute technisch möglich, wird aber noch nicht in ausreichendem Maße vollzogen, vor allem weil die derzeit gesetzlich geltenden Maßnahmen nicht ausreichend sind. Dies gilt u. a. für die Verwendung natürlicher Kältemittel in der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik, den Einsatz von alternativen Treibmitteln bei der Herstellung von Dämmstoffen, den Ersatz von SF<sub>6</sub> durch alternatives Isoliermedium in elektrischen Betriebsmitteln oder die verstärkte Nutzung HFKW-freier medizinischer Dosieraerosole. Würden bis zum Jahr 2050 alle heute technisch möglichen Maßnahmen umgesetzt werden und die Annahmen des GreenSupreme-Szenarios voll greifen, könnten die F-Gas-Emissionen auf ein Minimum von 1,1 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> gegenüber 2010 abgesenkt werden.

Um den in den Green-Szenarien skizzierten Treibhausgasminderungsbeitrag bei den F-Gasen zu erreichen, sind zum Teil hohe Ambitionssteigerungen bei den Akteuren erforderlich. Forschungsbedarf wird insbesondere in folgenden Bereichen gesehen:

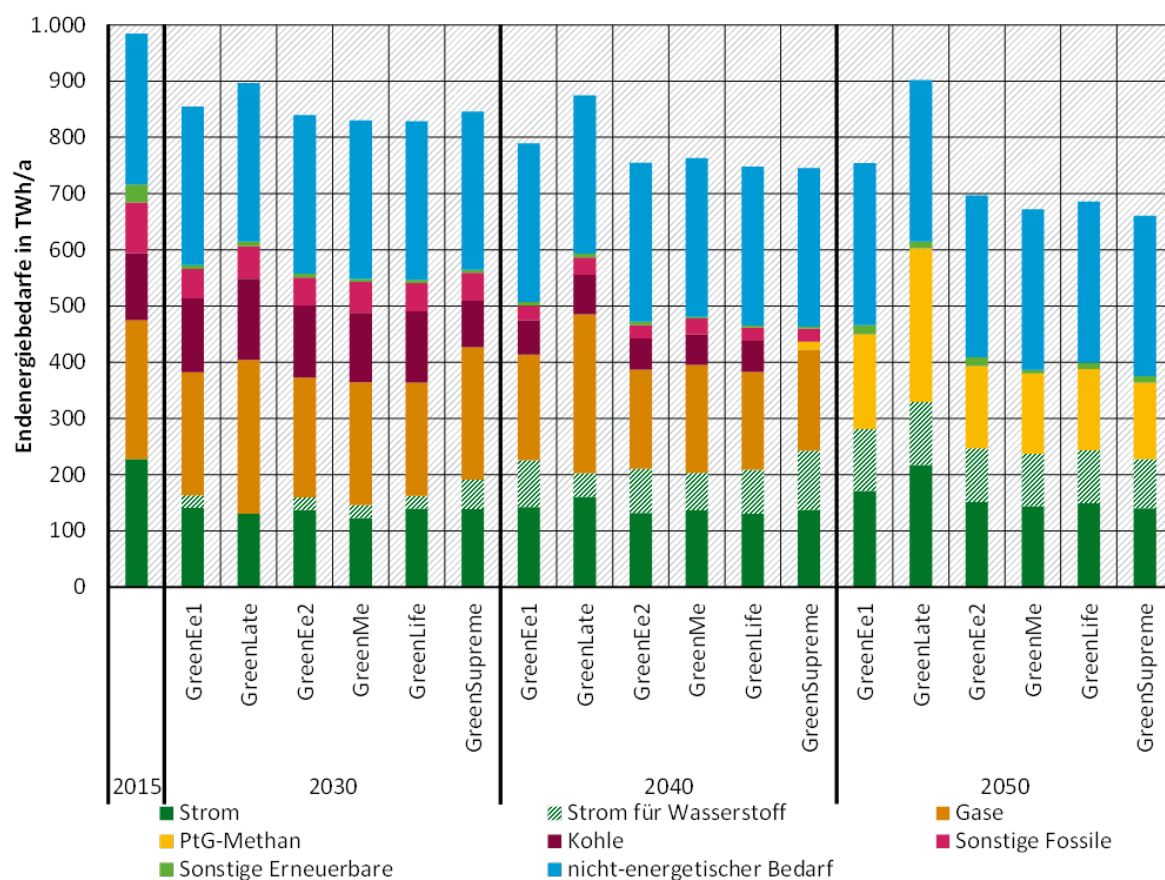
- ▶ Ausstieg aus fluorierten Kältemitteln insbesondere bei Wärmepumpen und in der Raumklimatisierung als Beitrag zur Wärme- und Kältewende im Baubereich,
- ▶ konsequenter Ersatz von SF<sub>6</sub> in elektrischen Betriebsmitteln vor dem Hintergrund der Energiewende sowie
- ▶ Ersatz von SF<sub>6</sub> in sekundären Magnesiumgießereien.

### 5.5.13 Zusammenfassung

Die Entwicklung der Endenergiebedarfe über die gesamten industriellen Anwendungen ist in Abbildung 5-107 zu sehen. Entsprechend des Szenariocharakters werden in GreenLate die geringsten Energiebedarfsminderungen umgesetzt. In 2050 werden noch rund 900 TWh

Endenergie benötigt, was nur eine geringe Reduktion von etwa 9 % gegenüber 2015 bedeutet. In GreenSupreme erfolgt aufgrund der höheren Ambitionen bei Energie- und Materialeffizienz sowie der sinkenden Nachfrage eine Reduktion um 33 % auf rund 660 TWh inklusive der nicht-energetischen Bedarfe. In allen Green-Szenarien wirken bis 2030 vornehmlich Maßnahmen zur Energieeffizienz, erst in den Dekaden danach wirkt sich ergänzend die Umstellung der Prozesstechniken hin zu effizienten Sektorkopplungstechniken auf die benötigten Endenergiebedarfe aus. In GreenSupreme wird von Beginn an ein ambitionierterer Transformationspfad eingeschlagen, so dass frühzeitig eine noch höhere Energie- und Materialeffizienz erreicht wird und die Umstellung der Prozesstechniken frühzeitiger erfolgt. Der schnell eingeleitete Ausstieg aus der Kohlenutzung ist im Anstieg der Strombedarfe für die Wasserstoffelektrolyse zur Substitution des Hochofen-Prozess in der Eisen- und Stahlerzeugung

**Abbildung 5-107: Entwicklung der Endenergiebedarfe im Bereich Industrie nach Endenergieträgern**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

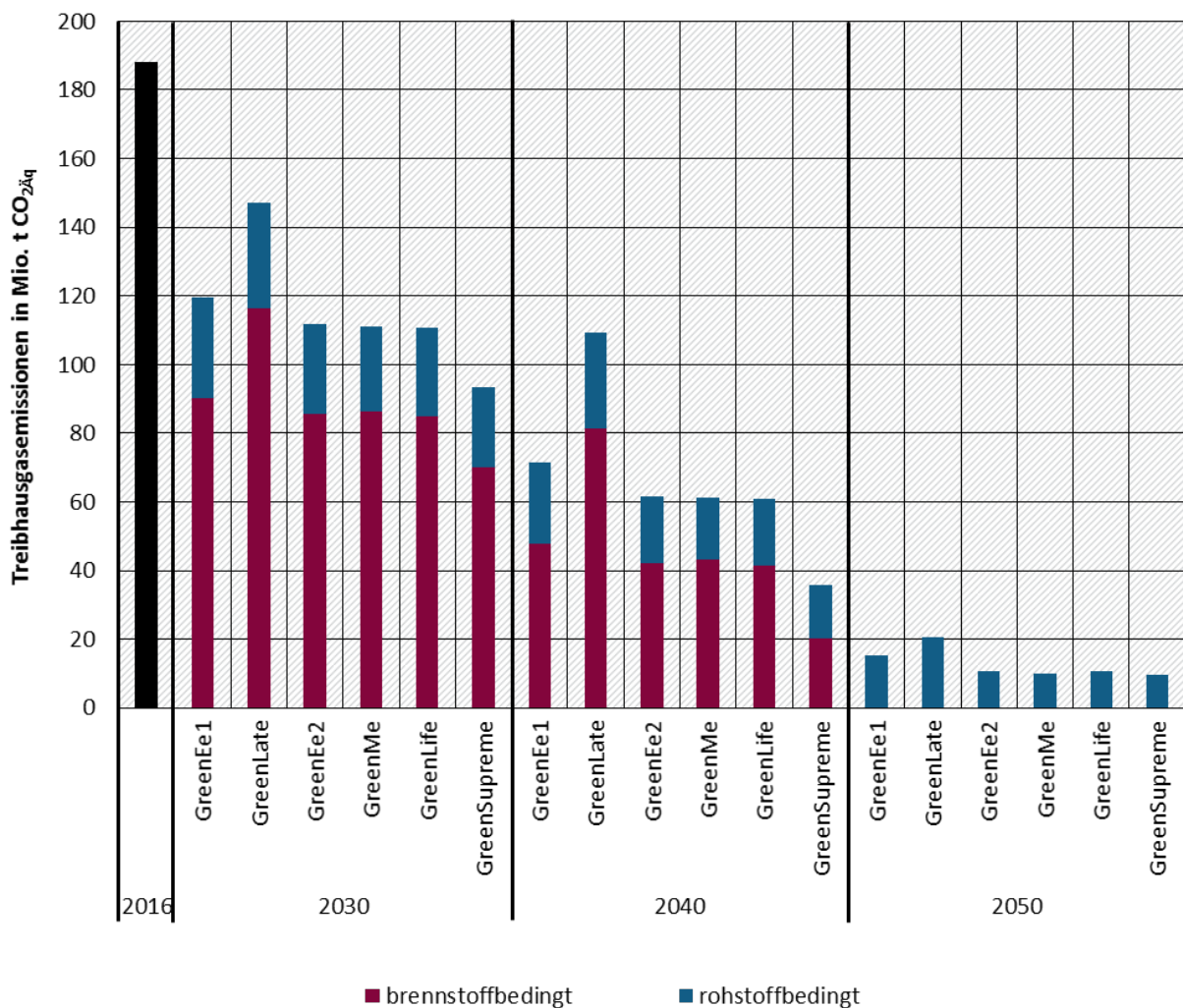
Die sich in Summe ergebenden Treibhausgasemissionen sind Abbildung 5-108 abgebildet. In allen Green-Szenarien werden die energie- und rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen der Industrie<sup>116</sup> bis 2050 um rund 96 % gegenüber 1990 gemindert. Hauptemittenten der verbleibenden Emissionen sind dann die Zement-, Kalk- und Glasindustrie sowie die chemische Industrie. Die Eisen- und Stahlerzeugung trägt nur noch zu maximal 1,2 % zu den verbleibenden rohstoffbedingten THG-Emissionen bei.

Das ambitionierte Umsetzen von Klimaschutzmaßnahmen in GreenSupreme im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien wird in 2030 und 2040 offenkundig. Neben den technische Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz sowie die Umstellung auf

<sup>116</sup> Bilanzsystematik nach Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung.

erneuerbare Energien unterstellt aus den GreenEe-Szenarien, den nachhaltigen Konsum hin zu langlebigeren und reparaturfähigen Produkten aus GreenLife und den nochmaligen Steigerungen zur Materialeffizienz aus GreenMe wirkt ergänzend der vollständiger Ausstieg aus der Kohlenutzung bis 2040. Die energie- und rohstoffbedingten verursachen etwas gleich viele Treibhausgasemissionen in 2040 in GreenSupreme.

**Abbildung 5-108: Entwicklung der Treibhausgasemissionen über alle Bereiche der industriellen Produktion hinweg**



Hinweis: inklusive der Emissionen aus der Verwendung fluorierter Treibhausgase sowie von Lösemitteln und anderen chemischen Produkten.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) sowie historischen Werte auf Basis von (BMU, 2019b)

#### 5.5.14 Schlussfolgerungen

Zur Erreichung der Klimaschutzziele müssen die Industrieanlagen bis 2050 nicht nur vollständig auf erneuerbare Energieträger umgestellt, sondern auch ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umgebaut werden. Dafür muss die Umstrukturierung der Energieversorgung möglichst frühzeitig so weit vorangeschritten sein, dass erneuerbarer Strom in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Anderenfalls würde die Substitution fossiler Energieträger und die Integration neuer Stromverbraucher, z. B. Elektrolyseanlagen zur Wasserstofferzeugung, nicht zu einer wirklichen

Treibhausgasminderung, sondern lediglich zu einer Verlagerung von Emissionen in die Energiewirtschaft führen, siehe Kapitel 5.2.

Auch ist es zur Begrenzung des Investitionsaufwands für den Umbau der Industrieprozesse erforderlich, dass dieser nach und nach entsprechend der üblichen Erneuerungszyklen erfolgen kann und damit frühzeitig die erforderlichen Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarfe initiiert wurden. Nur so kann bei Anlagen mit langen Nutzungszeiten bzw. Erneuerungszyklen (z. B. Hochöfen) die Umstellung des gesamten Anlagenpark bis 2050 abgeschlossen werden.

Zentraler Baustein ist der vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische und nicht-energetische industrielle Anwendungen. Hierfür sind folgende Schritte zur ambitionierten Umsetzung erforderlich:

- ▶ Die Substitution fossiler Energieträger sollte, soweit technisch möglich, durch die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom (z. B. zur Prozesswärmeerzeugung) erfolgen, um den Gesamtenergiebedarf für das Energiesystem zu begrenzen. Hier besteht in einigen Industriebranchen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.
- ▶ Die Erzeugung der erneuerbaren strombasierten Brennstoffe (PtG/PtL) ist mit erheblichen Umwandlungsverlusten verbunden und führt gesamtwirtschaftlich zu einem deutlich höheren Strom- und Rohstoffbedarf. Daher sollten erneuerbare Brennstoffe in der Industrie nur dort zum Einsatz kommen, wo Strom aus technischen Gründen nicht genutzt werden kann (z. B. zur Erhitzung fester, schlecht wärmeleitender Einsatzstoffe).
- ▶ Die fossile Wasserstoffwirtschaft in Deutschland, ggf. mit einem zeitnahen Fokus auf die Petrochemie, sollte ab 2030 auf erneuerbare Energien durch Integration von Wasserstoffelektrolyse umstrukturiert werden.
- ▶ Für die zusätzlichen großen Bedarfe an Wasserstoff in der Industrie, z. B. zur Verwendung in der Eisen- und Stahlerzeugung, wird kein großräumiges Verteilnetz benötigt, da der Wasserstoff standortnah mittels erneuerbaren Stroms erzeugt werden kann.
- ▶ Gleichfalls muss auch der Rohstoffbedarf der Chemieindustrie spätestens 2050 vollständig durch erneuerbare Energien (PtG/PtL) gedeckt werden. Etwa 30 % des heutigen Bedarfs an fossilen Energieträgern in der Industrie entfallen auf Rohstoffbedarfe für chemische Prozesse in der organischen Chemie. Vor dem Hintergrund der Langlebigkeit und erhöhten Recyclingraten sind langlebige Produkte bereits ab 2030 durch erneuerbare Energieträger (PtG/PtL) in der chemischen Industrie zu substituieren.

Die Substitution der Energieträger und Rohstoffe reicht aber alleine nicht aus. Die Industrieprozesse müssen bis 2050 nicht nur vollständig auf erneuerbare Energieträger umgestellt, sondern es muss auch ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umgebaut und dahingehend weiterentwickelt werden, dass auch rohstoffbedingte bzw. prozessbedingte Treibhausgasemissionen gemindert werden. Dies betrifft vor allem die Prozesse zur Eisen- und Stahlerzeugung. Hierfür ist erforderlich:

- ▶ Treibhausgasarme Produktionsverfahren müssen schnell bis zur Anwendungsreife im großindustriellen Maßstab gebracht werden. Bei Anlagen mit langen Nutzungszeiten bzw. Erneuerungszyklen (z. B. Hochöfen) sollte möglichst bald, spätestens ab 2030, der Umbau gewährleistet werden und erfolgen.



- ▶ Alternative treibhausgasarme oder -neutrale Produkte zur Substitution von Produkten, die durch ihre Produktionsprozesse unweigerlich mit dem Freisetzen von Treibhausgasemissionen verbunden sind (bspw. Zementproduktion), müssen entwickelt, zur Marktreife geführt und integriert werden.

Flankiert durch ambitionierte Maßnahmen zur Energieeffizienz und Materialeffizienz wird der erforderliche Endenergiebedarf beeinflusst, die Integration der erneuerbaren Energien entlastet, im Transformationspfad einen wesentlichen Beitrag zur Treibhausgasminderung sowie die erforderliche kumulierte Primärrohstoffinanspruchnahme und die langfristige dauerhafte neue Primärinanspruchnahme beeinflusst. Wie in Abbildung 5-107 zu sehen ist, nimmt der Endenergiebedarf der Industrie insgesamt in allen Szenarien bis 2050 maximal um ein Drittel ab, nicht jedoch der Stromverbrauch. Dieser erhöht sich in einzelnen Szenarien sogar um bis zu 50 %. Zur Begrenzung des Bedarfs an neuen Stromerzeugungsanlagen ist es also sehr wichtig, dass parallel zur Umstellung der Energieträger und Prozesse weiterhin alle o.g. Vermeidungsansätze weiter verfolgt werden:

- ▶ Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung von energieeffizienten Techniken, Energiemanagement, Optimierung von Verfahren und Prozessen sowie eine konsequente Abwärmenutzung,
- ▶ Steigerung der Materialeffizienz in den Verarbeitungsprozessen,
- ▶ Steigerung der Recyclingraten durch eine bessere Sekundärrohstoffeffassung, effiziente Aufbereitung und möglichst hochwertige Verwertung,
- ▶ verstärkte Anwendung von Substitutionstechnologien, u. a. durch regelmäßig aktualisierte und fortgeschriebene Substitutionsroadmaps, wie sie das Umweltbundesamt vorschlägt, als wichtiges Instrument zur Ausrichtung der Industriepolitik,
- ▶ Nachfrage und Produktion von langlebigen und reparaturfähigen Produkten steigern,
- ▶ nachhaltiges Konsumverhalten.

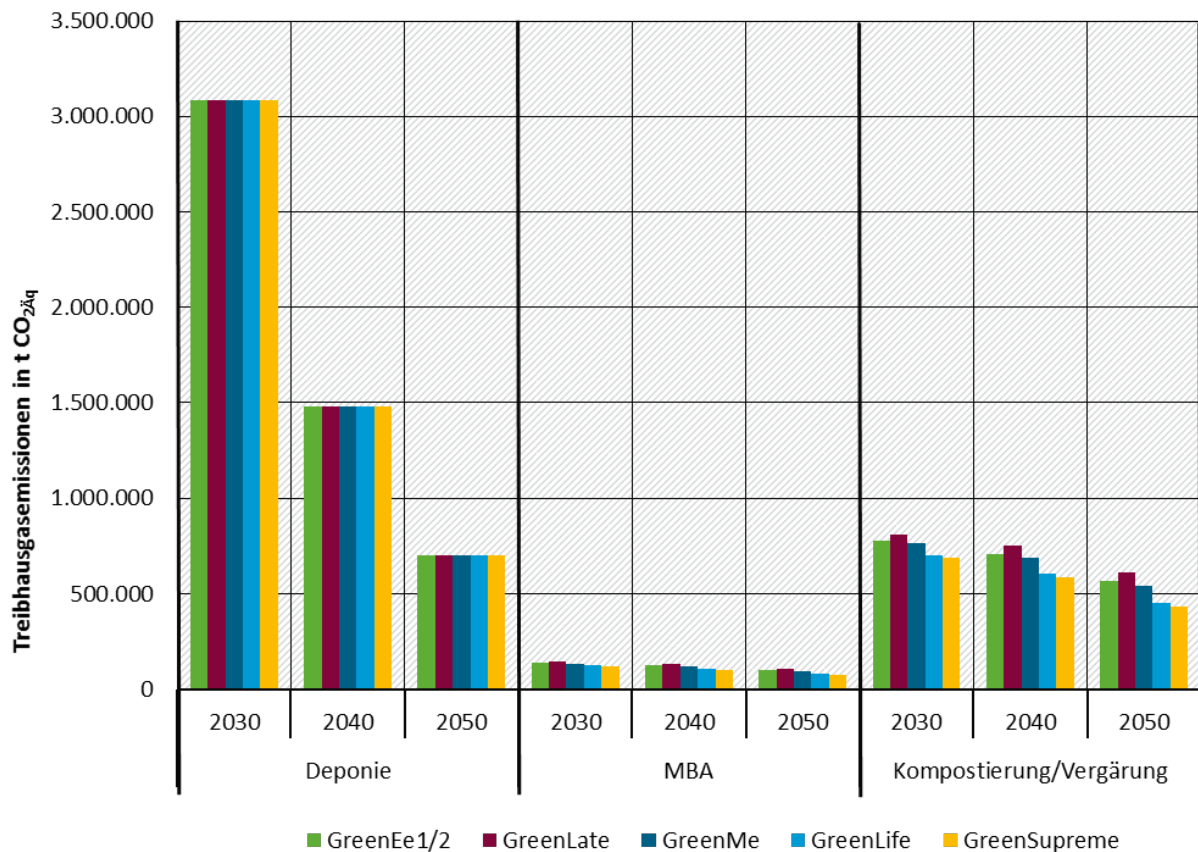
Dies setzt vor allem eine deutliche wirtschaftliche Besserstellung treibhausgasarmer- und treibhausgasneutraler bzw. schlechter Stellung treibhausgasintensiver Produkte voraus. Mit flankierenden Instrumenten, ist für die Unternehmen eine hinreichend langfristige Planungsgrundlage zu geben und die Konkurrenzfähigkeit der Unternehmen im internationalen Wettbewerb zu erhalten.

## 5.6 Abfall und Abwasser

Die Entsorgung von Abwasser und Abfall ist ein zentraler Pfeiler der öffentlichen Gesundheitsvorsorge und schützt die Umwelt vor unerwünschten Einträgen. Auch zukünftig werden sowohl die Entsorgung des Abwassers als auch die Entsorgung des Abfalls eine wichtige Rolle spielen. Damit einhergehend ist der Ausstoß von Treibhausgasen, welcher durch Abfall- und Abwassertechnik, durch die vorgelagerten Prozesse zur Produktion von Produkten, Umfang von Recycling und Erfassung von Abfällen sowie der Lebensweise und Ernährung der Menschen beeinflusst wird. Aus dem im Kapitel 3.1 beschriebenen Charakteristiken der betrachteten Szenarien, ergeben sich auch im Bereich Abfall und Abwasser Änderungen. Insgesamt sind die resultierenden Unterschiede jedoch gering. In Abbildung 5-109 sind die Treibhausgasminderungen dargestellt. Von mehr als 38 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq im Jahr 1990 werden diese

auf unter 3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq reduziert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass schon heute eine deutliche Minderung auf 10,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq gegenüber 1990 erreicht wurde (BMU, 2019b).

**Abbildung 5-109: Zeitlicher, szenariotypischer Verlauf der Treibhausgasemissionen der Sektoren Abwasser und Abfall**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Nachfolgend werden die Emissionen in die Sektoren Abfall und Abwasser aufgeschlüsselt und detailliert dargestellt.

### 5.6.1 Abfallwirtschaft

Der Bereich Abfall teilt sich in die drei relevanten Bereiche Deponie, mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen (MBA) und Kompostierung und Vergärung auf.

Für einen Großteil der Emissionen der Abfallwirtschaftlich sind Methanemissionen aus Deponien verantwortlich. Seit 1990 sind die Treibhausgasemissionen aus Deponien auf rund 11 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq gesunken. Dieser rückläufige Trend setzt sich in allen betrachteten Szenarien im identischen Maße fort. Neben dem Deponierückbau und dem zunehmenden biologischen Abbau der organischen Bestandteile des Deponiekörpers wird auch eine aerobe Stabilisierung (Deponiebelüftung) bei 30 % bis 2050 der Anlagen angenommen. 2030 betragen die Treibhausgasemissionen noch etwas mehr als 3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq und 2050 schließlich 0,7 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq.

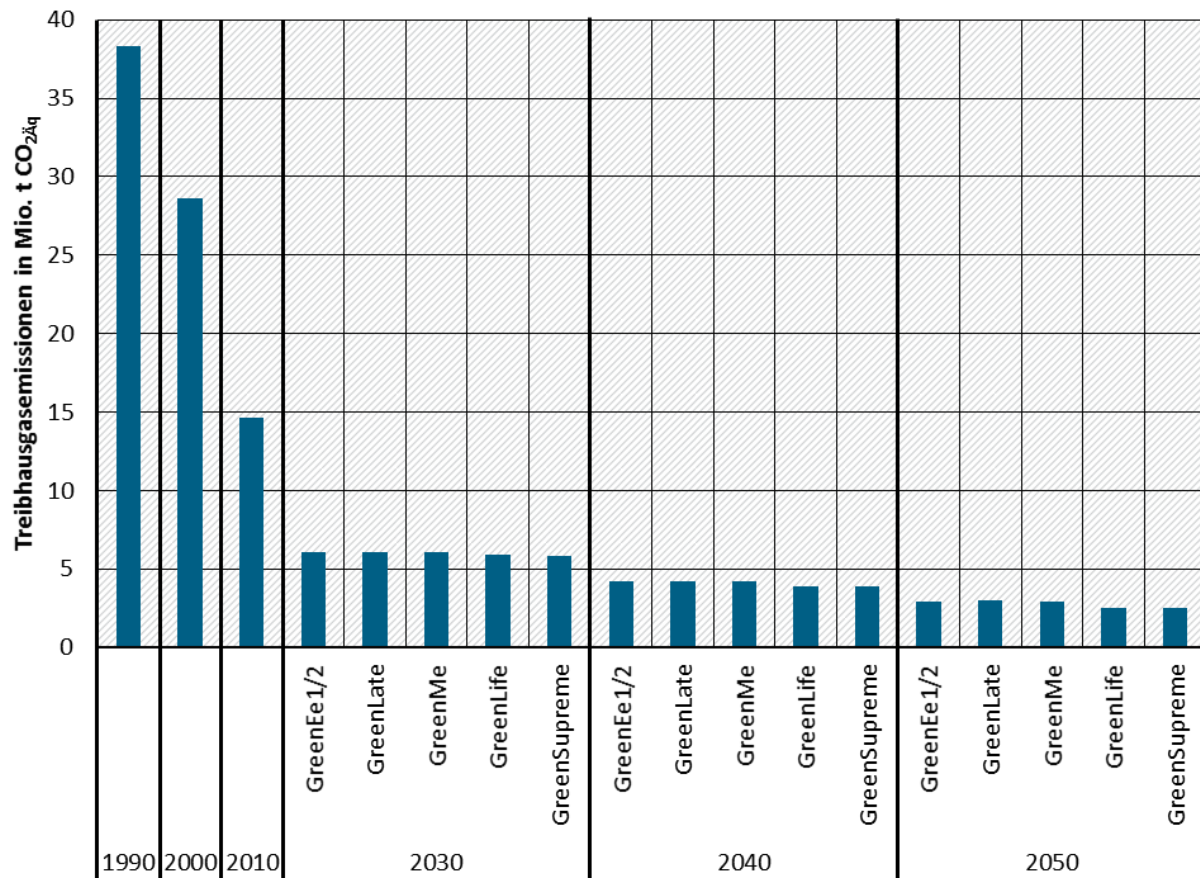
Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen aus MBA wird in allen betrachteten Szenarien eine kontinuierliche Umrüstung zu mechanisch-biologischen Stabilisierungsanlagen (MBS) unterstellt, so dass 2050 ausschließlich MBS-Anlagen in Betrieb sind. Hierdurch können Abgasmengen, Methan- und Lachgasemissionen reduziert werden.

Weiterhin wird in allen betrachteten Szenarien unterstellt, dass spätestens ab 2050 ausschließlich kohlenstoffhaltige Abfälle in die Abfallwirtschaft gelangen, die auf erneuerbaren Energien basieren. Dafür ist in allen Szenarien erforderlich, dass im Kontext der Kaskadennutzung, Recycling u.ä. bedacht wird und frühzeitig langlebige Produkte auf erneuerbare Energieträger umgestellt und nicht mehr aus Basis fossiler Energieträger produziert werden, siehe dazu Kapitel 5.2.4 und 5.5.5.

Die zu entsorgenden Abfallmengen unterscheiden sich in den betrachteten Szenarien entsprechend ihrer Charakteristik. In GreenEe1 und GreenEe2 wird eine konstante zu behandelnde Menge aus Restsiedlungsabfälle in Höhe von 5 Mio. t angenommen. In GreenLate fallen hingegen höhere Abfallmengen aufgrund der geringsten Materialeffizienz an und in GreenMe werden durch erhöhte Materialeffizienz die Abfallmengen um 8 % verringert. Das veränderte Verhalten beim Konsum und weniger Verpackungsmaterialien wird in GreenLife durch eine Reduktion der Abfallmengen um 20 % gegenüber GreenEe1 und GreenEe2 abgebildet. GreenSupreme weist sowohl die Vorteile von GreenMe als auch von GreenLife auf, so dass in diesem Szenario entsprechend die geringsten Abfallmengen entstehen und die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen am geringsten sind. Konkret liegen die Emissionen im Jahr 2050 aus den Abfallbehandlungsanlagen im Bereich von rund 75.000 t (GreenSupreme) bis rund 105.000 t (GreenLate).

Diese Änderungen der Abfallströme spiegeln sich auch im Bereich der Kompostierung und Vergärung, so dass auch hier die betrachteten Szenarien eine Bandbreite aufzeigen. Grundlegend wird in allen betrachteten Szenarien ab 2020 eine gesteigerte getrennte Erfassung der Abfallströme unterstellt. Dementsprechend steigt der Anteil der Bioabfallvergärung und der der Kompostierung sinkt. Darüber hinaus werden technische Maßnahmen zur Treibhausgasminderung unterstellt, wie beispielsweise aktive Belüftung von Rotteprozessen konsequente Erfassung von Biogas und Vermeidung von Leckagen sowie Abscheidung von Ammoniak aus Abgasen. Damit können die Treibhausgasemissionen aus Kompostierungs- und Vergärungsanlagen auf zwischen 435.000 t CO<sub>2</sub>Äq in GreenSupreme und auf 614.000 t CO<sub>2</sub>Äq GreenLate reduziert werden.

In Abbildung 5-110 ist die zeitliche und szenariotypische Entwicklung der Treibhausgasemissionen zusammenfassend dargestellt. Darin wird deutlich, dass die Emissionen aus Deponien die Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft prägen. Vor diesem Hintergrund bestehen auch die größten Minderungspotentiale bei den Deponien, welche in allen betrachteten Szenarien erschlossen werden und gegenüber 1990 eine Minderung um 98 % zeigen. Die gesteigerte Abfallvermeidung in GreenLife ermöglicht gegenüber GreenEe2 eine weitere Treibhausgasminderung um knapp 100.000 t CO<sub>2</sub>Äq. Diese Minderungspotentiale erscheinen als gering, sind aber im Kontext der langfristigen Klimaschutzziele und einer maximalen Treibhausgasneutralität ein wichtiger Beitrag.

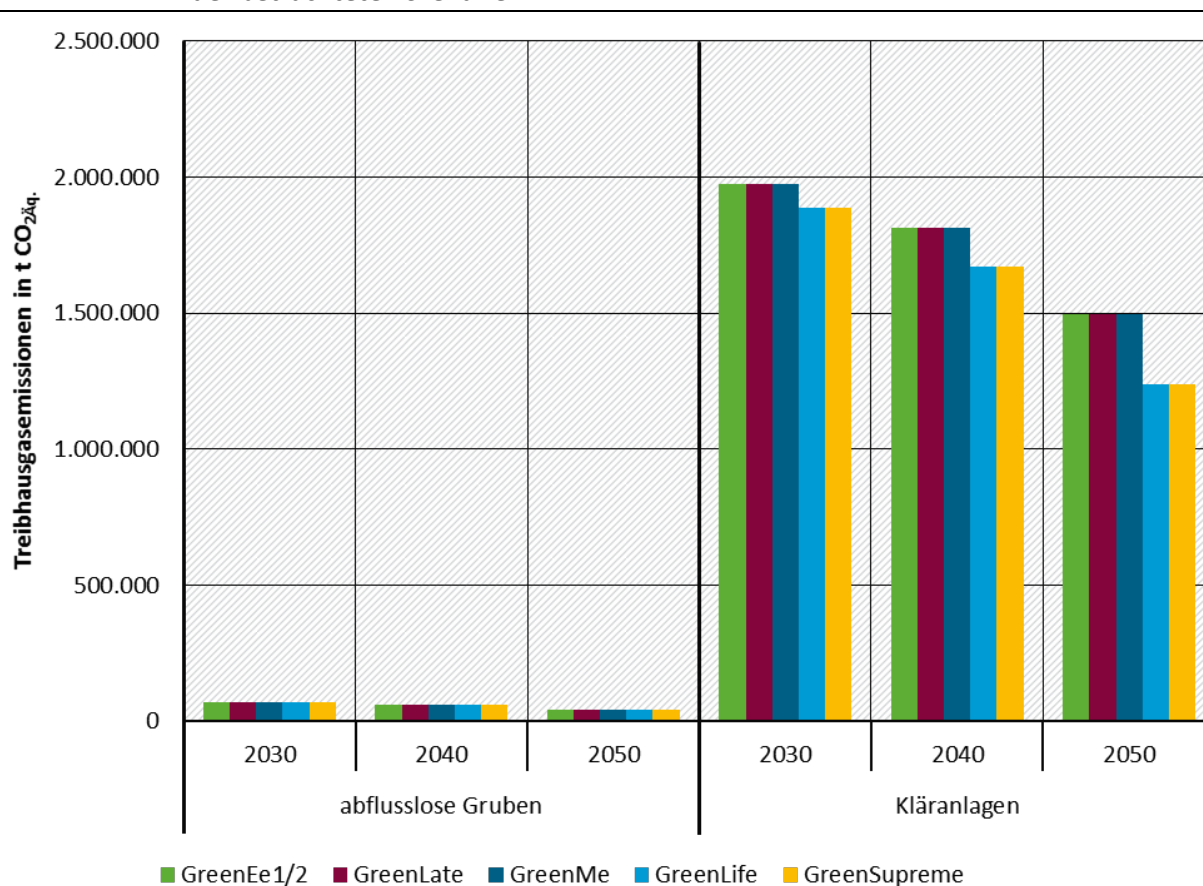
**Abbildung 5-110: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der betrachteten Szenarien im Abfallbereich (Deponie, MBA, Kompostierung/Vergärung)**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.6.2 Abwasserwirtschaft

Im Bereich Abwasser werden Treibhausgasemissionen beim Betrieb abflussloser Gruben und Kläranlagen verursacht. Die heutigen Abwasserentsorgungstechniken sind bereits fortschrittlich, weitere Maßnahmen werden in allen betrachteten Szenarien in identischem Maße unterstellt. Konkret bedeuten diese eine kontinuierliche Reduktion der abflusslosen Gruben aufgrund des Bevölkerungsrückgangs im ländlichen Raum und eine Steigerung des Anschlussgrades an die öffentliche Abwasserinfrastruktur. Hierdurch können die Emissionen aus abflusslosen Gruben bis 2050 in allen Szenarien um 50 % reduziert werden. Die Treibhausgasemissionen der Kläranlagen werden durch die Ernährungsweise der Bevölkerung beeinflusst, so dass sich die szenarienspezifischen Annahmen hier widerspiegeln. Konkret führt die Reduzierung der Proteinzufuhr von heute 36 kg/E/a auf 28 kg/E/a in GreenEe, GreenLate und GreenMe zu sinkenden Emissionen von heute etwas über 2,2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq auf rund 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq in 2050. In GreenLife und GreenSupreme wird die Proteinzufuhr weiter reduziert auf 23 kg/E/a, so dass die Treibhausgasemissionen aus Kläranlagen 2050 noch rund 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq betragen. Dies ist zusammenfassend in Abbildung 5-111 dargestellt.



**Abbildung 5-111: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im Bereich Abwasser von 2030 bis 2050 der betrachteten Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### TextBox 5-11: Herausforderung bei der Emissionsberechnung

Die Berechnungsgrundlagen des nationalen Inventarberichtes zum Deutschen Treibhausgasinventar werden laufend an den aktuellen Wissensstand angepasst, um die Anforderungen der IPCC zu erfüllen. In der vorliegenden Studie basiert die Berechnungsmethodik und dementsprechend die Daten auf der offiziellen Berichterstattung Deutschlands gegenüber dem Sekretariat der UN-Klimarahmenkonvention aus dem Jahr 2016 (UBA, 2016a).

Die zurückliegenden Anpassungen im Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung führten zu Veränderungen der Emissionsdaten für Lachgas und Methan und zu einer entsprechenden Reduktion der berichteten  $\text{CO}_2\text{Äq.}$  Die  $\text{CO}_2\text{Äq.}$  nach der angepassten, aktuell verwendeten Berechnungsgrundlagen liegen unterhalb der für 2050 prognostizierten Emissionen (vgl. Abbildung 5-111). Weitere Veränderungen der Bemessungsgrundlagen sind auch zukünftig wahrscheinlich.

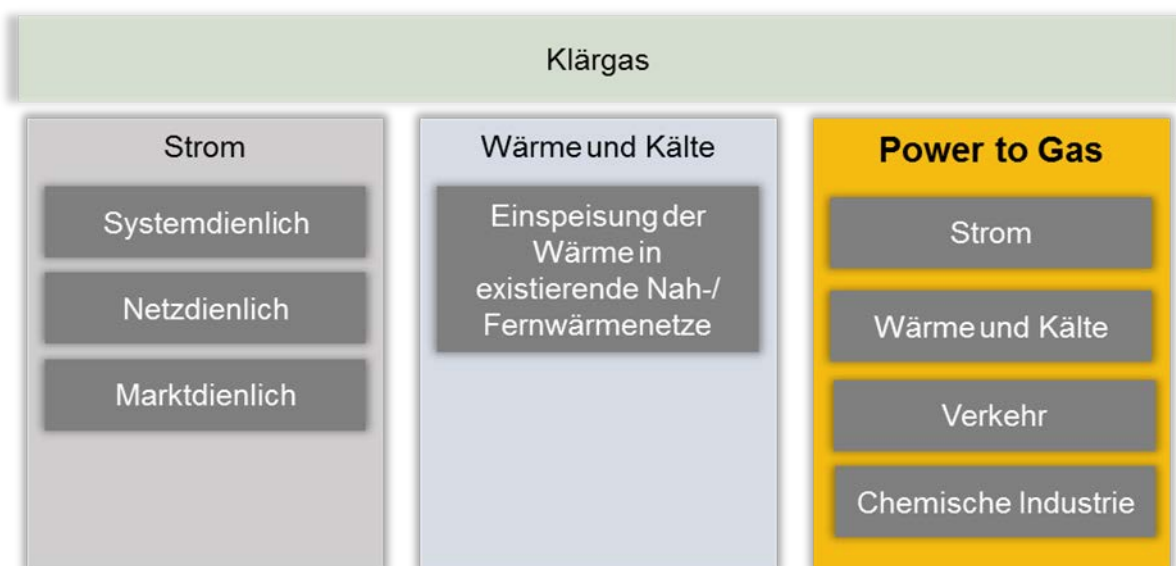
### 5.6.3 Beitrag zur Energieversorgung

Neben den bereits thematisierten Minderungen der Treibhausgasemissionen kann der Abfall- und Abwassersektor durch die systemisch effiziente Nutzung der anfallenden Stoffströme und die Reduktion des Eigenverbrauchs einen Teil zur sicheren und zukunftsfähigen Energieversorgung beitragen. Dabei sollten Energieeffizienzmaßnahmen weiterhin im Vordergrund stehen und eine Alternative für die inflexible Stromerzeugung gefunden werden.

Klärgas aus der Abwasserwirtschaft ist eine erneuerbare Ressource, die als vielseitig einsetzbarer Energieträger zum Einsatz kommen kann. Die Abbildung 5-112 gibt einen Überblick zur Vielfalt der Verwendungsmöglichkeiten. Derzeit prägt vor allem die inflexible Erzeugung von Eigenstrom die Nutzung des Klärgases. Eine Entkopplung der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs von Kläranlagen wäre ein erster Schritt, um diese Prozesse getrennt voneinander zu optimieren und systemdienlich optimiert werden. Ähnlich wie Flexibilitäten der Elektromobilität oder Wärmeversorgung (Power to Heat) können auch in der Abwasserbehandlung Beiträge zur Systemstabilität geleistet werden, siehe auch (UBA, 2018c). Neben den unterschiedlichen Handlungsfeldern flexibler Stromerzeugung und -verbrauch, bieten auch die Wärme- und Kälteversorgung Einsatzmöglichkeiten. Über die Aufbereitung und anschließende Einspeisung ins Gasnetz kann eine flexible sektorunabhängige Nutzung von Klärgas ermöglicht werden.

In den betrachteten Szenarien wird diesen Aspekten der flexiblen Nutzung Rechnung getragen. In allen betrachteten Szenarien wird neben der Verstromung und Wärmenutzung im gleichen Maße auch die Einspeisung ins Gasnetz unterstellt und damit Klärgas als ein hochwertiger Brennstoff für alle Anwendungsbereiche zur Verfügung gestellt. In den Szenarien wird davon ausgegangen, dass dieser gesamtsystemisch effektive Betrieb von Kläranlagen bereits 2030 durchsetzt. Im Jahr 2030 werden rund 2,5 TWh aufbereitetes Klärgas ins Gasnetz eingespeist und leisten so einen Beitrag zur Dekarbonisierung. Im Jahr 2050 trägt Klärgas mit 3 TWh zur Versorgung gasförmiger Brennstoffe bei.

**Abbildung 5-112: Nutzungsmöglichkeiten von Klärgas in den unterschiedlichen Sektoren**



Quelle: (UBA, 2018c)

Die Abfallströme der Abfallwirtschaft werden in allen betrachteten Szenarien in der leitungsgebundenen Wärmeversorgung in flexiblen Heizwerken und flexiblen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen genutzt.

Insgesamt reduziert sich der Beitrag zur Wärmeversorgung der bereitgestellten Endenergie aus dem Abfall- und Abwassersektor in den betrachteten Szenarien auf 3 bis 4 TWh bis zum Jahr 2050. Zur Stromversorgung werden 2050 knapp 7 TWh beigetragen.

**TextBox 5-12: Bedeutung der Verfahren zur Klärschlammstabilisierung**

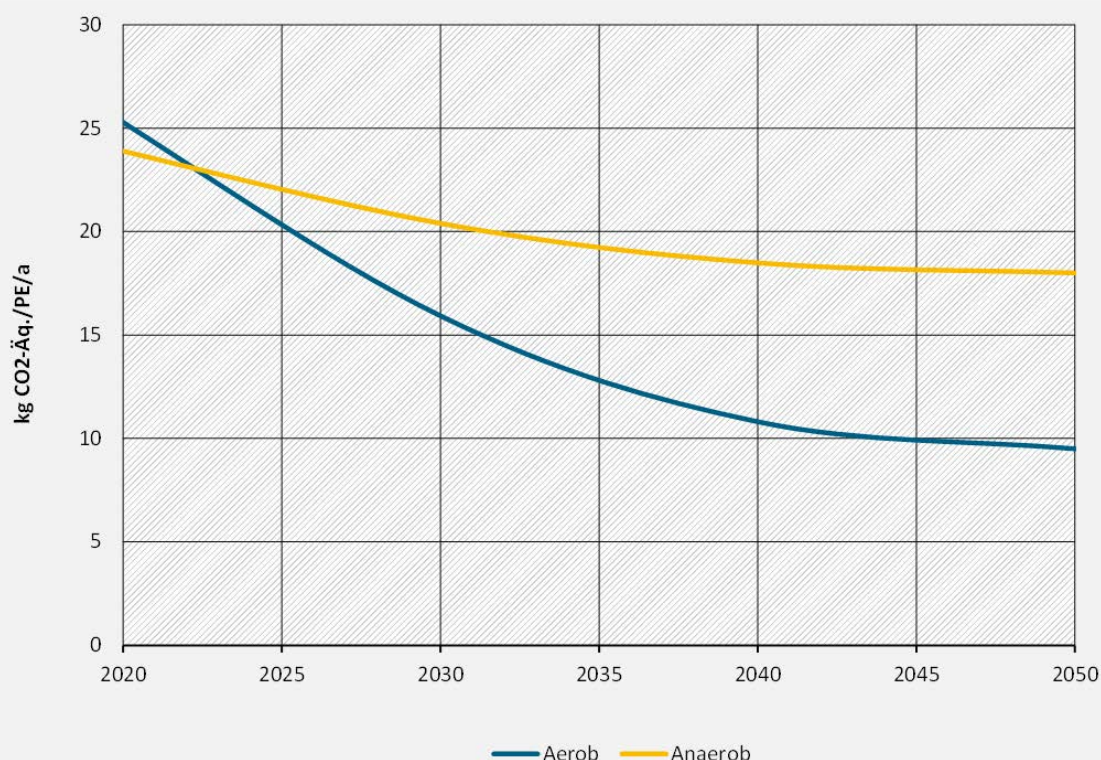
Im Bereich der Abwasserentsorgung gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, die anfallenden Klärschlämme zu stabilisieren. Neben der aeroben Stabilisation ist insbesondere auf größeren Anlagen (größer 30.000 angeschlossenen Einwohnerwerten) die anaerobe Stabilisation das gängige Verfahren. Im Gegensatz zur aeroben Stabilisation entsteht bei der anaeroben Stabilisation Klärgas, welches flexibel in der Energieversorgung eingesetzt werden kann. Vor diesem Hintergrund gewinnt die anaerobe Stabilisation an Bedeutung.

Die Treibhausgasemissionen beider Techniken sind von unterschiedlichen Faktoren, wie der Gesamtstickstoffentfernung, der Phosphorentfernung und indirekt dem Stromverbrauch abhängig (Parravicini et al., 2016).

Für die anaerobe Schlammstabilisierung mit fortschrittlicher Gesamtstickstoffentfernung (90 %) werden Treibhausgasemissionen von 24,6 kg CO<sub>2</sub>Äq/PE/a angegeben, was in etwa den Treibhausgasemissionen einer aeroben Behandlung (27,2 kg CO<sub>2</sub>Äq/PE/a) entspricht. Das bedeutet, dass mit leicht höheren Treibhausgasemissionen durch die Bereitstellung von Klärgas ein Beitrag zur Energieversorgung und damit zur Einsparung von anderem erneuerbarem Strom sowie den dafür erforderlichen Rohstoffen geleistet werden kann.

Im Transformationspfad sind die indirekten Treibhausgasemissionen durch Strom zu berücksichtigen, die derzeit für 65 % der aeroben und für 27 % der anaeroben Treibhausgasemissionen verantwortlich sind.

Abbildung 5-113: PE basierte Treibhausgasemissionen anaerober und aerober Schlammstabilisierungsverfahren im zeitlichen Verlauf



Quelle: eigene Berechnung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a) und (Parravicini et al., 2016)

Abbildung 5-113 zeigt beispielhaft an GreenEe2 (siehe Kapitel 5.2.3) die PE basierten Treibhausgasemissionen im zeitlichen Verlauf. Bis 2050 sinken die indirekten Treibhausgasemissionen auf 0 g/CO<sub>2</sub>Äq/kWh. Unter dieser Annahme stoßen bereits vor 2030 anaerobe Schlammstabilisierungsverfahren pro PE mehr g CO<sub>2</sub>Äq/kWh aus als aerobe. Die Substitution von erneuerbarem Strom durch die anaeroben Abwasserentsorgungsanlagen ist mit Blick auf eine Minimierung der Treibhausgasemissionen nicht mehr die präferierte Verwendung des Klärgases.

#### 5.6.4 Schlussfolgerungen

Im Sektor Abwasser und Abfall reduzieren sich die Treibhausgasemissionen auf unter drei Millionen Tonnen. Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind gering und werden durch eine gesteigerte Materialeffizienz und Verhaltensänderung bspw. bei Verpackungen sowie eine reduzierte Proteinzufuhr induziert.

Eine weitere Reduktion der Treibhausgasemissionen und die effiziente Ressourcennutzung sind im Abfall- und Abwasserbereich wesentlich durch die folgenden Maßnahmen möglich:

- ▶ ein konsequent durchgeführter Umbau von MBA zu MBS,
- ▶ eine Vermeidung sämtlicher Abfallströme, die nicht auf erneuerbaren Energien basieren und eine anspruchsvolle Kaskadennutzung der unterschiedlichen Rohstoffe,
- ▶ ein systemischer und dementsprechend mit Blick auf den Klimaschutz sinnvoller stärkerer Einsatz der erneuerbaren Ressource Klärgas.

### 5.7 Landwirtschaft und Landnutzung

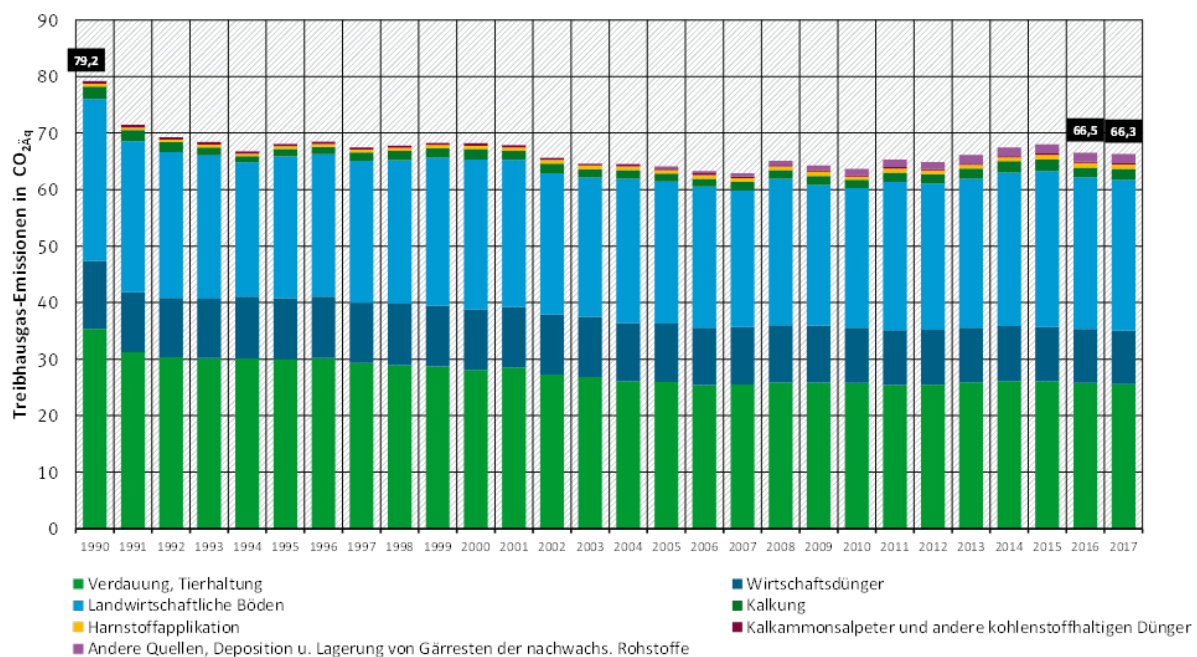
Die Landwirtschaft hat mit der Erzeugung von gesunden Lebensmitteln eine besondere Bedeutung für die Gesellschaft. Sie ist lebensnotwendig. Die Landwirtschaft ist außerdem sowohl Quelle von Treibhausgas-Emissionen als auch besonders anfällig für die Folgen des Klimawandels. Während es viel Potenzial gibt, die Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft zu reduzieren, ist es aufgrund der aus natürlichen physiologischen Prozessen stammenden Emissionen, wie z. B. Methan das bei der Verdauung von Wiederkäuern oder Lachgas das bei der Nutzung landwirtschaftlicher Böden entsteht, nicht möglich den Sektor gänzlich klimaneutral zu gestalten. Klimaneutralität kann ohne einen Ausgleich durch natürliche Kohlenstoffsinken (z. B. Wald oder Feuchtgebiete) nicht erreicht werden. Denn dafür müsste die landwirtschaftliche Produktion vollständig eingestellt werden, was mit der Ernährungssicherung der Bevölkerung nicht vereinbar ist. Daher gilt es hier Wege und Möglichkeiten aufzuzeigen, mit denen die Emissionen aus der Landwirtschaft durch entsprechende Maßnahmen maximal reduziert werden können und gleichzeitig die Ernährungssicherung der Bevölkerung gewährleistet wird.

Die landwirtschaftlichen Emissionen betrugen 2017 insgesamt 66,3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Das sind ca. 7,3 % der gesamten Treibhausgasemissionen Deutschlands. Die Emissionen entstammen z. B. aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden. Hierbei wird insbesondere das sehr klimawirksame Lachgas freigesetzt (26,6 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq). Hauptgrund dafür ist die Stickstoffdüngung mit Mineral- und Wirtschaftsdüngern. In der Verbesserung der N-Effizienz, d. h. der sparsamen und zielgerichteten Ausbringung von Stickstoff, besteht damit Potenzial zur Senkung dieser Emissionen. Gleichzeitig können damit andere negative Wirkungen auf die Umwelt reduziert werden, wie z. B. die Nitratbelastung im Grundwasser und die Eutrophierung von Gewässern.



Mit 25,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Aq sind Methanemissionen aus der Tierhaltung eine weitere große Quelle. Hier wird Methan bei der Verdauung von Wiederkäuern freigesetzt. Der Rückgang der Treibhausgas-Emissionen Anfang der 1990er Jahre ist vor allem (neben Effizienzsteigerungen bei der Düngung) auf den Abbau der Viehbestände in den Neuen Bundesländern zurückzuführen und zeigt eindrucksvoll, dass in der Viehhaltung großes Minderungspotenzial für Treibhausgas-Emissionen besteht. Seit dem Rückgang in den frühen 1990er Jahren änderten sich diese Emissionen in den letzten zehn Jahren jedoch nur geringfügig und liegen nach wie vor auf hohem Niveau. Weitere Quellen sind die Lagerung von Wirtschaftsdünger, vor allem Gülle, und Gärresten, die Kalkdüngung und die Anwendung von Harnstoff (vgl. Abbildung 5-114).

**Abbildung 5-114: Treibhausgas-Emissionen der Landwirtschaft nach Kategorien**



Hinweis: Die Aufteilung der Emissionen entspricht der UN-Berichterstattung, nicht den Sektoren des Aktionsprogrammes Klimaschutz 2020.

Quelle: (UBA, 2019k)

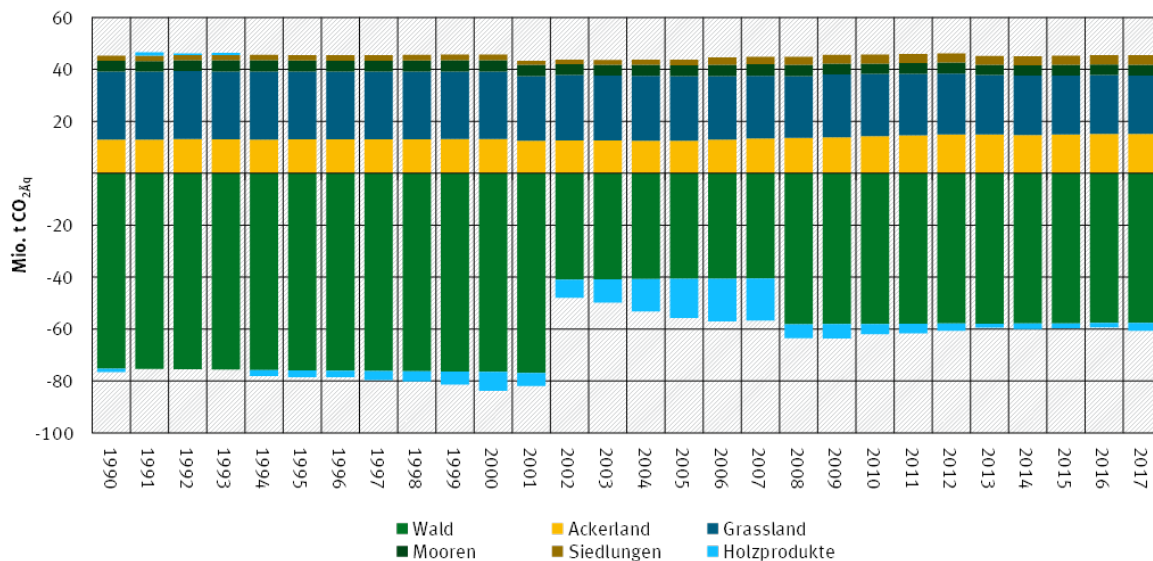
Durch landwirtschaftlich verursachte Landnutzungsänderungen, wie die Entwässerung von Moorböden oder den Umbruch von Grünland entstehen zusätzliche Emissionen, die aber nicht der Landwirtschaft, sondern gemäß der internationalen Klimaberichterstattung dem Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) zugerechnet werden. In der Kategorie LULUCF werden alle anthropogen verursachten Emissionen und Senken von Treibhausgasen mit Landbezug behandelt – neben Ackerland auch Wald, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungsflächen und sonstige Flächen.

Aufgrund der natürlichen, physiologischen Prozesse können Treibhausgasminderungen in der Landwirtschaft nur zum Teil durch technische Maßnahmen erzielt werden. Für einen hohen Beitrag zur Treibhausgasminderung sind geänderte Produktionssysteme und vor allem ein Abbau der Tierbestände (v. a. der Wiederkäuer) notwendig. Um Verlagerungseffekte, z. B. durch die Importe von tierischen Produkten aus anderen Ländern zu vermeiden, muss parallel auch der Konsum tierischer Produkte auf ein Maß reduziert werden, das einer gesunden Ernährung, z. B. gemäß DGE-Empfehlung, entspricht. Dabei spielt auch der Selbstversorgungsgrad von tierischen und pflanzlichen Erzeugnissen eine wichtige Rolle. Dieser zeigt, in welchem Umfang die Landwirtschaft den heimischen Bedarf dieser Erzeugnisse deckt bzw. um welchen

Prozentsatz die Produktion den inländischen Bedarf übersteigt. Der Anteil der Produktion, der über den Eigenbedarf hinausgeht, wird in der Regel exportiert. Eine durch Verhaltensänderungen im Fleischkonsum reduzierte heimische Produktion führt nur dann zu einem Abbau der Viehbestände und somit zu Treibhausgasminderungen, wenn gleichzeitig die Selbstversorgungsgrade und damit die Exportüberschüsse gleich bleiben.

In der Kategorie LULUCF ist die bisherige Emissionsentwicklung von einer fortwährend abnehmenden Netto-Kohlenstoffspeicherung im Wald sowie von hohen Emissionen der organischen Böden des Acker- und Grünlands geprägt, wie in Abbildung 5-115 zu sehen ist. In der Abbildung sind sprunghafte Änderungen an zwei Stellen erkennbar. Ursache dieser abrupten Änderungen ist eine rückwirkende Anpassung der Daten zur Kohlenstoffsénke der Wälder auf Basis der Waldinventuren in 2001, 2008 und 2017, die jeweils Änderungen der eingeschätzten Holzernte mit sich führte. Die Daten der jeweiligen vorherigen Periode wurden dementsprechend mit Durchschnittswerten für die gesamte Periode angepasst. Wegen der weiterhin hohen Kohlenstoffsénke des Waldes von rund -58 Mio. t CO<sub>2</sub>Aq im Jahr 2017 ist LULUCF insgesamt eine netto Kohlenstoffsénke (UBA, 2019b). Ohne weitere Maßnahmen ist allerdings zu erwarten, dass die Netto-Kohlenstoffeinspeicherung im Wald stark nachlässt (oder sogar so viel Kohlenstoff freigesetzt wird, dass der Wald, zumindest zeitweise, zur Emissionsquelle wird) (BMU, 2017) und die Emissionen der anderen Landnutzungsaktivitäten ähnlich hoch bleiben. Die wirksamsten Klimaschutzmaßnahmen sind deswegen diejenigen, die Moorböden restaurieren und Waldbiomasse weiter anreichern.

**Abbildung 5-115: Treibhausgas-Emissionen im LULUCF-Sektor**



Quelle: (UBA, 2019k)

Nachfolgend werden die möglichen Einflussparameter zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und die in den Green-Szenarien getroffenen Annahmen dargestellt. Grundlegend basieren die Annahmen zu technischen, strukturellen sowie gesellschaftlichen Änderungen auf der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland 2050“ (UBA, 2014c), wobei entsprechend der Szenariencharakteristika ein Lösungsraum für die Entwicklung im Bereich Landwirtschaft aufgespannt wird (Tabelle 5-27).

**Tabelle 5-27: Charakteristik der verschiedenen Szenarien im Bereich Landwirtschaft und LULUCF**

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Ambitionsniveau bei technischen Minderungen	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Änderungen des Fleischkonsums	hoch	hoch	hoch	Sehr hoch, sehr schnell	Sehr hoch, sehr schnell
Änderung des Milchkonsums	keine	keine	keine	Abnahme bis 2050	Abnahme bis 2050
Ambitionsniveau bei Änderung der Produktionskapazitäten	mittel/ Sehr hoch	mittel	mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Ausstieg aus dem Torfabbau	Bis 2040	Bis 2040	Bis 2040	Bis 2040	Bis 2040
Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse	Bis 2030	Bis 2030	Bis 2030	Bis 2030	Bis 2030
Ambitionsniveau bei der Nutzung von Holzprodukten	mittel	mittel	Sehr hoch	mittel	Sehr hoch

### 5.7.1 Technische Minderungsmaßnahmen

Unter den technischen Minderungsmaßnahmen werden Maßnahmen zusammengefasst, die durch technische Lösungen z. B. zur Reduktion der Lachgasemission aus landwirtschaftlichen Böden beitragen oder Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement mindern.

Durch ein Bündel solcher technischer Klimaschutzmaßnahmen ohne Produktionseinschränkungen ist es möglich, die Emissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft um rund 20 bis 25 % zu verringern. Die größten Potenziale bestehen hier bei der Stickstoffdüngung und dem Wirtschaftsdüngermanagement.

Der Einsatz von Stickstoffdüngern trägt erheblich zu den Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Landwirtschaft bei. Aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden wurden 2017 durch Stickstoffdüngung direkte und indirekte Lachgasemissionen in Höhe von 26 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq freigesetzt. Eine zentrale Maßnahme ist daher die Erhöhung der Stickstoffeffizienz. In allen Szenarien wird durch eine gesteigerte Stickstoffeffizienz (z. B. erreichbar durch die Optimierung der Düngeplanung und der Ausbringungstechniken) und einem geringeren Mineraldüngerbedarf der Stickstoff-Gesamtüberschuss auf maximal 50 kg N pro ha bis 2030 gesenkt. Dadurch können vor allem direkte und indirekte Lachgas-Emissionen verringert werden<sup>117</sup>.

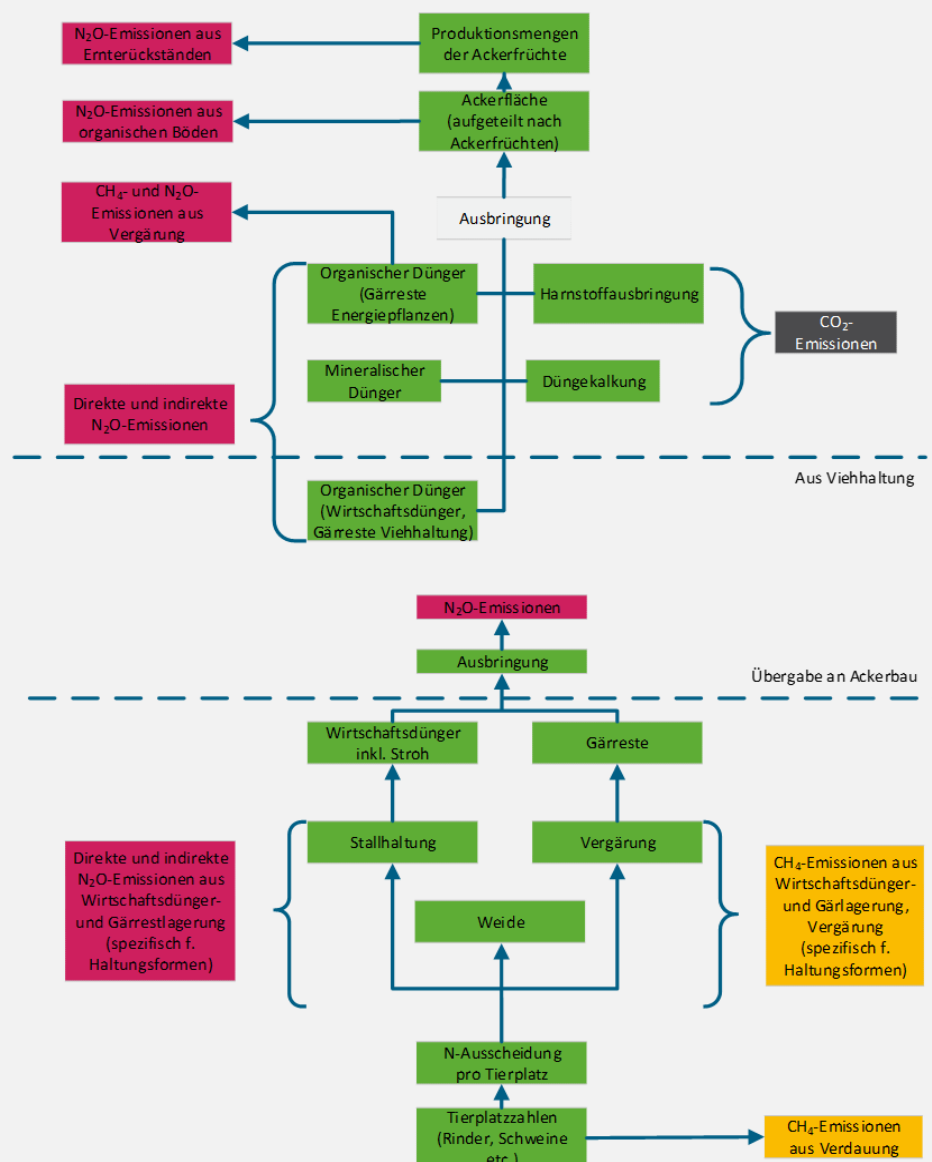
#### TextBox 5-13: Das Landwirtschaftsmodell ALMOD

Die Modellierung der landwirtschaftlichen und landnutzungsbedingten Emissionen erfolgte mit dem von ifeu entwickelten, excelbasierten Modell ALMOD (Agriculture and LULUCF Model). Zu

<sup>117</sup> Auch die Produktion der Mineraldünger verursacht erhebliche Treibhausgasemissionen. Diese werden jedoch gemäß internationaler Klimaberichterstattung nicht der Landwirtschaft zugerechnet sondern der chemischen Industrie. Diese Zurechnung wird auch in der vorliegenden Studie beibehalten.

den Eingangsparametern gehören die Viehzahlen (Rinder, Schweine, Geflügel, Schafe, Pferde), die Düngermengen sowie die Flächenverteilungen der Feldfrüchte und des Grünlands. Diese wurden kombiniert mit den entsprechenden aus der offiziellen Berichterstattung Deutschlands unter der UN-Klimarahmenkonvention (UBA, 2016a) abgeleiteten Emissionsfaktoren für den Ackerbau (Düngung) und die Tierhaltung sowie geschätzten Futterrationen für Rinder, Schweine und Geflügel. Basisjahr der Berechnungen ist 2010. Die variablen (veränderbaren) Parameter, anhand derer unterschiedliche Szenarien entwickelt werden können, sind die Tierzahlen (Rinder, Schweine, Geflügel, sonstige), die Haltungsformen, das Wirtschaftsdüngermanagement, die nationalen Versorgungsgrade je Produktgruppe und die Erträge (pflanzliche und tierische Produkte). Auf der Grundlage dieser Eingangsparameter können mit ALMOD Treibhausgasemissionen ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ), separat und in  $\text{CO}_2\text{-Äq}$ , biotische Extraktionen aus der Landwirtschaft für Nahrungs- und Futtermittel (12 Ackerfrüchte, 5 tierische Produkte), das Wirtschaftsdünger- und Gärrestaufkommen sowie die Flächeninanspruchnahme für Acker- und Grünland für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 berechnet werden. Die Eingangsparameter und die Modellstruktur sind in Abbildung 5-116 dargestellt.

Abbildung 5-116: Modellstruktur und Eingangsparameter von ALMOD



Quelle: (Dittrich et al., 2020a)



Die Emissionsentwicklungen der organischen Böden (unter Acker- und Weideland) wurden per Annahme über Entwässerungs- bzw. Wiedervernässungsraten berechnet. Die Annahmen zum Erhalt des Waldes als Netto-Kohlenstoffsенke orientieren sich im Wesentlichen an dem aktuellen „Naturschutzszenario“ des Modells für Waldentwicklung und Holzaufkommen (WEHAM, (Oehmichen et al., 2018; Rüter et al., 2017)). Die wesentlichen Eigenschaften des WEHAM-Naturschutzszenarios sind:

Waldumbau: 15 % Erhöhung des Anteils an Laubholz

Verlängerung der Umbtriebszeiten

Erhöhung der Fläche ohne Holznutzung von 4 % auf 7 %

Erhöhung des Totholzanteils auf 40 m<sup>3</sup> je Hektar

► Reduzierung des Rohholzpotentials von 86 auf 76 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr

Das Wirtschaftsdüngermanagement verursachte 2017 rund 9,5 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>. Bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern wird vorrangig Methan, aber auch Lachgas freigesetzt. Mit der Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen und gasdichter Lagerung der Gärreste können diese Emissionen reduziert werden. Gleichzeitig wird das Biogas zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Es kann auf diese Weise fossile Energie substituieren, was sich auf die Emissionen des Energiesektors auswirkt (siehe Kapitel 5.2.3.2.7). Es wird daher angenommen, dass ab 2030 alle Gärrestlager abgedeckt sind und bis 2050 alle erfassbaren Mengen an Gülle und Mist in Biogasanlagen vergoren werden. Damit können die THG-Emissionen bis 2050 stark reduziert werden. Die verbleibenden Restemissionen liegen zwischen 0,99 und 1,85 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>. Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen werden ab dem Jahr 2030 in Deutschland außerdem keine nachwachsenden Rohstoffe mehr eigens für die energetische Nutzung angebaut. Somit sinken die Emissionen der Gärreste aus NaWaRo-Biogas ab 2030 auf null.

In jedem der sechs Green-Szenarien wird angenommen, dass die Umsetzung dieser technischen Klimaschutzmaßnahmen in vollem Umfang erfolgt, das technisch mögliche Minderungspotenzial also voll ausgeschöpft wird. Entsprechend der Szenariencharakteristik erfolgt die Umsetzung dieser Maßnahmen in GreenLate verzögert.

## 5.7.2 Kalkung

Der Einsatz von Kalk auf landwirtschaftlichen Böden ist notwendig, um den pH-Wert der Böden zu stabilisieren und die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Gleichzeitig wurden durch die Kalkung 2017 ca. 1,9 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> freigesetzt. Die Erosionsgefahr wird in den kommenden Jahrzehnten durch heftigere und häufigere Starkniederschläge aufgrund des Klimawandels jedoch so stark zunehmen, dass eine gute Bodenstruktur und damit mindestens so viel Kalkung wie heute notwendig sein wird. Mit der Ausnahme des GreenEe1-Szenarios<sup>118</sup> wird der Wert für die Emission von 2010 (1.700.000 t CO<sub>2Äq</sub>) in allen Green-Szenarien bis 2050 fortgeschrieben.

## 5.7.3 Ökolandbau

Der ökologische Landbau ist wegen des Verzichts auf chemisch-synthetische Dünge- und Pflanzenschutzmittel, nahezu geschlossener Nährstoffkreisläufe und weiter Fruchtfolgen eine

<sup>118</sup> Das GreenEe1-Szenario fokussierte als Zielpunkt in der Landwirtschaft die UBA-Studie (UBA, 2014c). Dort wurde dieser Aspekt nicht berücksichtigt, so dass eine abnehmende Kalkung im GreenEe1-Szenario fortgesetzt wurde.

besonders ressourcenschonende Form der Landwirtschaft. Der ökologische Landbau ist daher bei einer Vielzahl unterschiedlicher Umweltwirkungen gegenüber der konventionellen Landwirtschaft vorzüglich. Bei einer flächenbezogenen Betrachtung sind die Treibhausgasemissionen aufgrund der höheren Kohlenstoffspeicherungsrate und verminderter Lachgasemissionen im Ökolandbau geringer als im konventionellen Landbau. Bei einer produktbezogenen Betrachtung schneidet der Ökolandbau allerdings aufgrund der geringeren Erträge und des größeren Flächenbedarfs in Bezug auf die Treibhausgasemissionen nicht besser ab als der konventionelle Landbau (Thünen Institut, 2019). Ziel der Bundesregierung ist es, den Anteil des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlich genutzten Gesamtfläche auf 20 % zu steigern (BMEL, 2019d). Die Nachfrage nach ökologisch erzeugten Produkten und auch der Flächenzuwachs stiegen in den vergangenen Jahren kontinuierlich. Für eine Erreichung der Zielmarke müssen dennoch erhebliche Anstrengungen mit einer ausreichenden Umstiegs- und Beibehaltungsförderung unternommen werden, um den Flächenanteil von derzeit 9,1 % auf 20 % zu steigern.

In allen sechs Green-Szenarien wird ein Ökoflächenanteil von 20 % bis 2050 gemäß dem Nachhaltigkeitsziel der Bundesregierung zu Grunde gelegt.<sup>119</sup>

#### **5.7.4 Lebensmittelabfälle**

In Deutschland werden jährlich rund 11 Mio. t verzehrfähige Lebensmittel weggeworfen (BMEL, 2019c). Für die Emissionen des Landwirtschaftssektors sind diese dann relevant, wenn durch die reduzierte Verschwendung weniger produziert wird. Im nachgelagerten Bereich fallen im produzierenden Ernährungsgewerbe, im Handel und auf Verbraucherebene Lebensmittelabfälle an, insbesondere in den privaten Haushalten. Somit birgt die Einsparung von Lebensmittelabfällen ein großes Potenzial zur Verringerung von THG-Emissionen.

Etwa die Hälfte der in der gesamten Wertschöpfungskette entstehenden THG-Emissionen gilt als vermeidbar (WBAE & WBW, 2016). Deswegen werden in allen Green-Szenarien, die Lebensmittelabfälle um 50 % reduziert. Der resultierende Nachfragerückgang wird berücksichtigt.

#### **5.7.5 Torfabbau reduzieren**

Der Abbau von Torf, vor allem für gärtnerische Zwecke, führt zu einer Degradation noch vorhandener Moore und bedingte 2017 rund 2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. an Treibhausgasemissionen (UBA, 2019b). Um die noch vorhandenen Moore als Kohlenstoffsенke zu erhalten und zu renaturieren, wird der Torfabbau in allen Green-Szenarien bereits bis 2040 gestoppt und der Torf in gärtnerischen Erden durch alternative Produkte ersetzt.

#### **5.7.6 Erhalt der Waldkohlenstoffsенke**

Die Annahmen zum Erhalt des Waldes als Netto-Kohlenstoffsенke orientieren sich in allen Green-Szenarien an dem aktuellen „Naturschutzszenario“ des Modells für Waldentwicklung und Holzaufkommen (WEHAM, (Oehmichen et al., 2018)). Entsprechend verlängern sich insbesondere die Umtriebszeiten in Laubholzmischbeständen und die ungenutzte Waldfläche (Prozessschutz) wird auf 6,9 % erhöht. Gleichzeitig werden Waldbestände, die nicht einer

---

<sup>119</sup> Die methodische und datenspezifische Basis für die Berechnung dieses Teilaspektes bildet (UBA, 2014c). In der vorliegenden Studie und dem hier zur Anwendung kommenden Model ALMOD war eine Variation des Ökolandbauanteils in 2050 nicht in einem vertretbaren Aufwand-Nutzen-Verhältnis möglich, wenngleich dies aufgrund der geringeren THG-Emissionen des Ökolandbaus bei einer flächenbezogenen Betrachtung zielführend gewesen wäre.

natürlichen potenziellen Vegetation entsprechen (überwiegend Nadelholzbestände) aktiv umgebaut, was zunächst zu einer intensiveren Waldnutzung führt.

Durch diese Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass insgesamt das Holzaufkommen verringert wird, wodurch der Holzproduktspeicher abnimmt. Jedoch nimmt durch eine Ausweitung des Holzbaus in allen Szenarien (je nach Szenario in unterschiedlichem Maß, vgl. Kapitel 5.3.3.2) der langfristige Holzproduktspeicher zu. Aufgrund des Verbots bestimmter Holzschutzmittel im Außenbereich wird jedoch angenommen, dass einige Holzverwendungen im Außenbereich durch andere Materialien substituiert werden (bspw. bei Masten, Eisenbahnschwellen, etc.). Ferner wird die direkte energetische Nutzung von Holz durch eine verstärkte Kaskadennutzung weitgehend reduziert. Die energetische Nutzung von Waldrestholz sinkt bis 2050 auf Null (vgl. Kapitel Biomasse 5.2.3.2.7). Hierdurch steht dem verringerten Holzaufkommen auch ein verringerter Holzbedarf entgegen (vgl. Kapitel 5.3.6). Nicht betrachtet wurde die Auswirkung der Entwicklung zur überwiegend stofflichen Holznutzung auf den Holzproduktspeicher, der vermutlich zu einer zusätzlichen Kohlenstoffsänke führen würde.

### 5.7.7 Ernährung und Konsum

Unser Ernährungs- und Konsumverhalten hat erheblichen Einfluss auf die Höhe der Treibhausgasemissionen. Veränderte Konsum- und Ernährungsgewohnheiten sind, wenn sie sich auf die Produktion der heimischen Agrargüter auswirken, eine der wesentlichen Stellschrauben, wie die Ergebnisse der vorliegenden Studie verdeutlichen.

Der Ernährungssektor in Deutschland ist für rund 16 bis 22 % der gesamten THG-Emissionen verantwortlich. Dies beinhaltet die Bereitstellung, Verarbeitung, den Transport und den Handel von Lebensmitteln (Grünberg et al., 2010). Es ist folglich wichtig, mögliche THG-Einsparungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu betrachten. Insbesondere die Erzeugung tierischer Lebensmittel und der steigende Verarbeitungsgrad von Lebensmitteln verursachen hohe Emissionen. Hohe Treibhausgasemissionen pro Kilogramm verursachen z. B. Butter, Käse oder (Rind-)Fleisch, sehr niedrige Emissionswerte haben hingegen unverarbeitete pflanzliche Produkte wie Kartoffeln, Gemüse und Obst. Tierische Produkte verursachen höhere Emissionen, weil für ihre Herstellung mehr Flächen, Futtermittel, Wasser und Energie pro Kilokalorie (Kcal) erforderlich sind. Für den Anbau der Futtermittel müssen nicht nur zusätzliche energieintensive Dünge- und Pflanzenschutzmittel hergestellt werden, ihr Anbau verursacht global auch großflächige Landnutzungsänderungen (Grünlandumbruch und Entwaldung) und damit weitere hohe Emissionen (Grünberg et al., 2010). Neben den direkten und indirekten Emissionen aus dem Futtermittelanbau stoßen insbesondere Wiederkäuer das sehr klimaintensive Methan aus.

Eine gesündere Ernährung durch verringerten Konsum tierischer Erzeugnisse ist dementsprechend eine der effektivsten Maßnahmen zur Minderung von THG-Emissionen aus dem Bereich Landwirtschaft. Während der aktuelle fleischbetonte Ernährungsstil über 2 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Person und Jahr verursacht, liegt ein vegetarischer Ernährungsstil im Durchschnitt bei rund 1,5 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Person und Jahr (Meier & Christen, 2013; UBA, 2019d). Ein reduzierter Verzehr tierischer Produkte wäre nicht nur im Sinne einer gesünderen, sondern auch einer klimaschonenden Ernährungsweise und entspricht gleichzeitig der Verzehrempfehlung der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE, siehe TextBox 5-14). Auch die Herkunft der Nahrungsmittel spielt eine Rolle. Der Anbau von Gemüse in Gewächshäusern verursacht aufgrund des hohen Energieverbrauchs beispielsweise mehr Treibhausgasemissionen als der saisonale Anbau von Freilandgemüse (von Koerber & Kretschmer, 2009). Auch längere Transportwege von Importprodukten sind meist mit höheren Treibhausgas-Emissionen verbunden sind. Emissionen aus dem Energieverbrauch und Transportemissionen konnten jedoch in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt werden.

In den Green-Szenarien wurden die DGE-Empfehlungen für pflanzliche (Obst, Gemüse, Getreideprodukte, Kartoffeln, Hülsenfrüchte) und tierische Produkte (Fleisch, Milch und Eier) als Grundlage für die Ernährungsweise der deutschen Bevölkerung in 2050 angesetzt. Das Ambitionsniveau und der Zeitpunkt der Erreichung dieses Ziels variieren. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenMe wird für den Fleischverzehr angenommen, dass sich dieser bis 2050 auf 30 % des heutigen Verzehrs reduziert. Das entspricht einer wöchentlichen Verzehrmenge von 344 g. In den ambitionierteren, durch Veränderungen der Lebensstile geprägten Szenarien GreenLife und GreenSupreme wird die Untergrenze der DGE-Empfehlung beim Fleischverzehr ab 2040 angenommen. Das entspricht einer Verzehrmenge von 300 g pro Person wöchentlich. Gegenüber dem heutigen Verzehr von ca. 1150 g pro Person und Woche bedeutet dies eine Reduktion um nahezu 75 %. Gleichzeitig wird in diesen zwei Szenarien angenommen, dass der Konsum von Frischmilch um 15 % bis 2040 zurückgeht, da sich mehr Menschen vegan ernähren und Milch teilweise durch Sojamilch aus heimisch angebautem Soja ersetzt wird.

#### **TextBox 5-14: Übersicht über die wichtigsten Agrarprodukte für die menschliche Ernährung**

Der überwiegende Teil der produzierten Agrarprodukte wird in Deutschland für die menschliche Ernährung verwendet. Das Ernährungsverhalten der Bevölkerung wird dabei durch viele Faktoren bestimmt. Die zunehmende Nahrungsvielfalt, veränderte und vielfältige Lebensstile und gesellschaftliche Strukturen sowie der vermehrte Verzehr von Fertigprodukten und Außer-Haus-Verpflegung haben die Nahrungszusammensetzung und das Ernährungsverhalten der Bevölkerung in den letzten Jahrzehnten maßgeblich verändert (UBA, 2014c).

Der Pro-Kopf-Verbrauch der verschiedenen Nahrungsmittel gibt Auskunft über die Ernährungsgewohnheiten und Trends in Deutschland. Seit 1960 ist besonders der starke Rückgang des Kartoffelkonsums von 132 kg in 1960 auf 57,9 kg im Jahr 2017 auffallend, während Getreideerzeugnisse nach großen Schwankungen 2017 mit 82,6 kg pro Person nur etwas stärker konsumiert werden als 1960 (79,8 kg). Der Obstverbrauch ist gegenüber 1960 (81,4 kg) zurückgegangen (2017: 65,1 kg), während der Gemüseverbrauch seit 1960 mit starken Schwankungen insgesamt gewachsen ist (von 48,8 kg in 1960 auf 99,6 kg in 2017, (BMEL, 2017)).

Der Fleischverbrauch ist seit 1960 von 59,7 auf 88,1 kg gestiegen (davon 60 kg für den menschlichen Verzehr<sup>120</sup>), wobei Schweinefleisch stark an Bedeutung gewonnen hat. Auch die vermehrte Nachfrage nach Geflügelfleisch scheint sich weiter fortzusetzen und lag 2017 bei 20,9 kg pro Kopf. Seit etwa 2010 ist der Konsum von Fleisch insgesamt rückläufig mit Ausnahmen beim Kalb- und Rindfleisch. Hier steigt der Verbrauch seit 2014 wieder leicht an (BMEL, 2017).

Der Verzehr von Frischmilcherzeugnissen (88,2 kg/pro Kopf/Jahr) geht zurück, jedoch werden vermehrt verarbeitete Milchprodukte wie Käse (24,2 kg/pro Kopf/Jahr), Butter (5,8 kg/pro Kopf und Jahr), Sauermilcherzeugnisse (29,9 kg/pro Kopf/Jahr) und Sahneprodukte (5,7 kg/pro Kopf/Jahr) konsumiert (BMEL, 2019b).

Der Verbrauch von Hülsenfrüchten, der bereits im Jahr 1960 mit 1,5 kg pro Kopf und Jahr auf sehr niedrigem Niveau lag, erreichte im Jahr 2014 mit 0,5 kg pro Kopf seinen Tiefpunkt. Seitdem sind die Hülsenfrüchte wieder im Kommen und erreichten 2017 mit 1,3 kg pro Kopf nahezu die Menge von 1960. Ob sich der Trend fortsetzt, bleibt abzuwarten. In den Green-Szenarien wird den Hülsenfrüchten als wertvolle Eiweißlieferanten und aufgrund ihrer positiven Anbaueigenschaften

<sup>120</sup> Ohne Knochen, Futter, industrielle Verwertung und Verluste.



(u. a. kann auf den Einsatz von chemisch-synthetischen Düngemitteln verzichtet werden) eine wichtige Bedeutung beigemessen.

Der derzeitige, durchschnittliche Verzehr der deutschen Bevölkerung weicht bei einigen Lebensmittelgruppen stark von der ernährungswissenschaftlichen Empfehlung der DGE ab (DGE, 2017). Diese empfiehlt einen hohen Verzehr von pflanzlichen Lebensmitteln mit geringem Verarbeitungsgrad, eine hohe Zufuhr von Ballaststoffen aus Getreideprodukten, insbesondere aus Vollkornprodukten und sekundären Pflanzenstoffen. Die DGE strebt mit ihren Empfehlungen eine ausgewogene und gesunde Ernährungsweise der Bevölkerung an. Die Empfehlungen für Fleisch und Wurstprodukte werden maßgeblich überschritten. Die DGE empfiehlt aus gesundheitlichen Gründen den Verzehr von 300-600 g Fleisch- und Wurstzeugnissen wöchentlich. Auf das Jahr gerechnet ergibt sich ein Fleischverzehr von 15,6 bis 31,2 kg pro Kopf. Die Gesamtmenge an Fleisch für den menschlichen Verzehr liegt in Deutschland mit 60 kg etwa doppelt so hoch wie die Obergrenze der DGE-Empfehlungen. Die Untergrenze der Empfehlung wird sogar knapp vierfach überschritten.

Die empfohlene Menge an Frischmilch und Milchprodukte (Joghurt, Sahne, Käse) liegt bei 200 bis 250 g Milch und Milchprodukte und 2 Scheiben (50 bis 60 g) Käse täglich. Hier liegt der durchschnittliche Verbrauch mit 241 g in der Nähe der Obergrenze der Empfehlung.

Die DGE empfiehlt drei Eier pro Person und Woche zu verzehren. Das entspricht 186 g/Woche was 156 Eiern pro Person und Jahr entsprechen würde. Der tatsächliche Verbrauch wird mit 230 Eiern pro Person und Jahr um ein Drittel überschritten.

Bei Obst und Gemüse erreichen die in Deutschland pro Kopf verzehrten Mengen die Empfehlungen der DGE nicht. Diese liegen bei ca. 250 g Obst und 400 g Gemüse pro Tag. Tatsächlich verzehrt werden aber ca. 178 g Obst und 272 g Gemüse.

### 5.7.8 Viehbestände

Die Viehhaltung ist in Deutschland mit rund 40 Mio t CO<sub>2</sub>Äq bzw. 60 % der landwirtschaftlichen Treibhausgas-Emissionen Hauptverursacherin von Treibhausgasen innerhalb des Landwirtschaftssektors. Dazu gehören Methan, das insbesondere während des Verdauungsvorgangs von Wiederkäuern freigesetzt wird und Lachgas, das bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern entsteht und aus landwirtschaftlich genutzten Böden freigesetzt wird. Verdauungsvorgänge von Tieren waren 2017 für Methanemissionen in Höhe von 25,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq verantwortlich. Die Lagerung von Wirtschaftsdüngern führte zu Emissionen von Methan und Lachgas in Höhe von 9 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Hinzu kommen Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden, dazu gehören 5 Mio t CO<sub>2</sub>Äq aus Wirtschaftsdüngern und 1 Mio t CO<sub>2</sub>Äq aus dem Weidegang der Tiere.

Neben der Emission von Klimagasen ist die Tierhaltung maßgeblich für die hohen Stickstoffüberschüsse und den mit ihnen verbundenen Umweltbeeinträchtigungen verantwortlich. Die Stickstoffüberschüsse sind in Deutschland unterschiedlich verteilt, mit Hotspots in den viehintensiven Regionen Nord-West- sowie Süddeutschlands. Zu den negativen Umweltwirkungen gehören der Artenverlust infolge von Eutrophierung und Versauerung und der Eintrag von Nitrat ins Grundwasser. Die Nitratkonzentrationen im Grundwasser überschreiten in den Intensivtierhaltungsregionen Nord-Westdeutschlands häufig den Grenzwert von 50mg/L. Nitrat kann im Grundwasser zum krebserregenden Nitrit umgewandelt werden. Das kann dazu führen, dass in Zukunft vielerorts das Grundwasser für die Trinkwasserbereitstellung kostenintensiv aufbereitet werden muss.

Außerdem ist die deutsche Tierhaltung für 95 % der hiesigen Ammoniakemissionen verantwortlich. Der überwiegende Teil der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen stammt aus der Rinderhaltung (52 %), der Schweinehaltung (20 %), der Geflügelhaltung (9 %) sowie der Mineraldüngeranwendung (15 %). In der Schweinehaltung entsteht der Großteil der Emissionen direkt im Stall, in der Rinderhaltung bei der Wirtschaftsdüngerlagerung und -ausbringung. Ammoniak und das nach Umwandlung entstehende Ammonium schädigen Land- und Wasserökosysteme erheblich durch Versauerung und Eutrophierung (Nährstoffanreicherung). Bodenversauerung und Nährstoffübersorgung natürlicher und naturnaher Ökosysteme (wie zum Beispiel Moore, Magerstandorte, Gewässer) können zu Veränderungen der Artenvielfalt führen. Besonders hohe Ammoniakkonzentrationen in der Umgebung von großen Tierhaltungsanlagen können zu direkten Schäden an der Vegetation führen (UBA, 2014a). Klimarelevant ist Ammoniak ebenfalls, da schätzungsweise 1 bis 2 % der Ammoniakemissionen in das sehr klimawirksame Lachgas<sup>121</sup> umgewandelt werden (Thünen Institut, 2013). Osterburg et al. 2013 schätzen, dass die indirekten Lachgasemissionen in Deutschland in 2010 2,21 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq betrugen, was einem Anteil von rund 5,3 % der gesamten Lachgasemissionen der Landwirtschaft in Deutschland entspricht. Die Ziele der EU-NERC-Richtlinie (EP & Rat der Europäischen Union, 2016) sehen vor, dass Deutschland seine NH<sub>3</sub>-Emissionen bis 2030 um 29 % im Vergleich zu 2005 reduziert. Auch vor diesem Hintergrund wäre ein Abbau der Viehbestände hilfreich.

Die Reduzierung der Tierbestände ist die größte Stellschraube für landwirtschaftliche Treibhausgase in den Green-Szenarien. Sie setzt allerdings auch gesündere Ernährungsgewohnheiten mit einer deutlichen Verringerung des Fleischkonsums und damit der heimischen Fleischproduktion voraus, denn andernfalls würde ein Abbau heimischer Tierbestände unweigerlich zu höheren Importen und damit zur unerwünschten Verlagerung der Emissionen in andere Länder führen (sogenannte Leakage-Effekte).

Entsprechend der Szenariencharakteristika werden die Tierbestände in den Green-Szenarien unterschiedlich stark reduziert und der Abbau unterschiedlich schnell realisiert. Vom Abbau der Viehbestände sind vor allem die Schweine- und Geflügelbestände betroffen, da die heimischen Rinderbestände für die Deckung der in Kapitel 5.7.7 beschriebenen Milchbedarfe erforderlich sind. Über die Milchproduktion fällt eine gewisse Mindestmenge an Fleisch an, da durchschnittlich die Hälfte der Nachkommen männlich ist und auch die Milchkühe selbst geschlachtet werden. Außerdem ist die weidebasierte Milchviehhaltung entscheidend für die Nutzung des Grünlandes. Dieses hat als Kohlenstoffsенke und für den Erhalt der Biodiversität eine wichtige Funktion. In GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenMe werden die DGE-Empfehlungen für Milcherzeugnisse sehr ambitioniert mit 200 g Milch und Milchprodukte/Tag + 2 Scheiben Käse unterstellt (UBA, 2014c). In GreenLife und GreenSupreme reduziert sich der Frischmilchkonsum bis 2040 um 15 % und damit auch die Zahl laktierender Rinder. Eine Verringerung der Fleischproduktion wird in den Green-Szenarien wie in (UBA, 2014c) durch diverse Anpassungen in der Rinderhaltung erreicht (bspw. Verlängerung der Umtriebszeiten, Umstieg von Färsen- auf Kälbermast, Zweinutzungsrasen) erreicht. Die Rindfleischproduktion ist daher bereits so optimiert, dass bei der unterstellten Milchproduktion kaum weitere Einsparungen möglich sind. Das Verhältnis von Milch und Rindfleisch wurde in allen Green-Szenarien als konstant angenommen. Der Rinderbestand wurde auf rund ein Drittel des heutigen Niveaus reduziert.

In GreenEe1 wird von einem reduzierten Fleischkonsum, der sich an den Empfehlungen der DGE, orientiert, ausgegangen. Diese Empfehlungen sehen vor, den Fleischkonsum bis 2050 auf

---

<sup>121</sup> Lachgas ist 298mal klimawirksamer als CO<sub>2</sub>.

30 % des heutigen Niveaus zu reduzieren. Dabei wird angenommen, dass die Tierbestände bis 2030 lediglich in geringem Umfang abnehmen. Danach wird, auch aufgrund geänderter Ernährungsgewohnheiten, ein kontinuierlicher Rückgang der Tierbestände auf rund ein Drittel des heutigen Niveaus bis 2050 realisiert.

Während im GreenLate-Szenario davon ausgegangen wird, dass durch einen verpassten Start zunächst nur ein moderater Abbau der Viehbestände realisiert wird, werden die Versäumnisse später nachgeholt und die Tierbestände werden ab 2030 bis 2050 kontinuierlich linear reduziert. Im GreenLife Szenario wird von einem linearen Rückgang der Tierbestände ab 2020 ausgegangen, um den Zielwert, Ernährung gemäß Untergrenze der DGE-Empfehlung, 2050 zu erreichen. GreenSupreme wird dieses Ziel bereits 2040 erreicht, was einen noch stärkeren Abbau der Viehbestände zur Folge hat.

Einhergehend mit der Abnahme der Tierbestände sind geringere Emissionen aus der Verdauung von Wiederkäuern sowie geringere Mengen an anfallendem Wirtschaftsdünger.

### 5.7.9 Produktion von landwirtschaftlichen Produkten

Wie bereits erwähnt, wirken sich Änderungen in der Ernährungsweise und ein reduzierter Fleischkonsum nur dann auf die Viehbestände aus, wenn aufgrund geringerer Nachfrage auch tatsächlich weniger produziert wird. Wenn eine abnehmende Fleischnachfrage auf der Konsumseite hingegen dazu führt, dass gleich viel produziert wird, steigen die Selbstversorgungsgrade und Fleischerzeugnisse werden exportiert. Global betrachtet werden dann zwar keine Mehremissionen verursacht<sup>122</sup>, für die deutsche Klimabilanz ist bei hohen Exportüberschüssen allerdings nichts gewonnen.

Tabelle 5-28 gibt einen Überblick über die heutigen Selbstversorgungsgrade der wichtigsten Ernährungsgüter.

**Tabelle 5-28: Übersicht über die Selbstversorgungsgrade wichtiger Ernährungsgüter**

Produkt	Selbstversorgungsgrad
Fleisch gesamt	115 % <sup>123</sup>
Eier gesamt	72 %
Frischmilch	116 %
Getreide	106 %
Kartoffeln	142 %
Gemüse	38 %
Obst	24 %

Quelle: (BMEL, 2018a): Versorgungsbilanzen verschiedener Ernährungsgüter

In der Vorgängerstudie (THGND, (UBA, 2014c) wird unter den getroffenen Annahmen des ÖKO20 %-Szenarios ein Selbstversorgungsgrad bei Fleisch von 345 % erreicht. Da die Annahmen dieses Szenarios auch in den Szenarien GreenEe1 und GreenLate zugrunde liegen, bedeutet dies, dass eine Anpassung der Fleischnachfrage sich in diesen beiden Szenarien nicht

<sup>122</sup> Wird durch die exportierten Güter eine gesteigerte Nachfrage im Ausland gedeckt, bleiben die globalen Emissionen in Etwa gleich. Wird im Ausland aufgrund der von Deutschland exportierten Güter weniger produziert können die globalen Emissionen sinken.

<sup>123</sup> Der hier dargestellte Selbstversorgungsgrad betrachtet nur das Fleisch. Es ist aber festzuhalten, dass aktuell Deutschland in hohem Maße Kraftfutter zur Fleischproduktion importiert.

unmittelbar in einer reduzierten Fleischproduktion abbilden lässt. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wurde unter der übergreifenden Prämisse, die Handelsbilanzen stärker auszugleichen (siehe Kapitel 3.1), der Selbstversorgungsanteil bei tierischer Nachfrage mit 150 % angenommen. Der Ausgleich erfolgt im Wesentlichen durch die Anpassung der Schweine- und Geflügelbestände.<sup>124</sup>

Die hierdurch frei werdenden Flächen werden im Wesentlichen für den Ausgleich des Verlusts an landwirtschaftlicher Fläche durch die Wiedervernässung von Mooren (Kapitel 5.7.10) und für Naturschutzmaßnahmen verwendet (siehe auch Kapitel 5.7.11).

#### **5.7.10 Wiedervernässung von Moorböden**

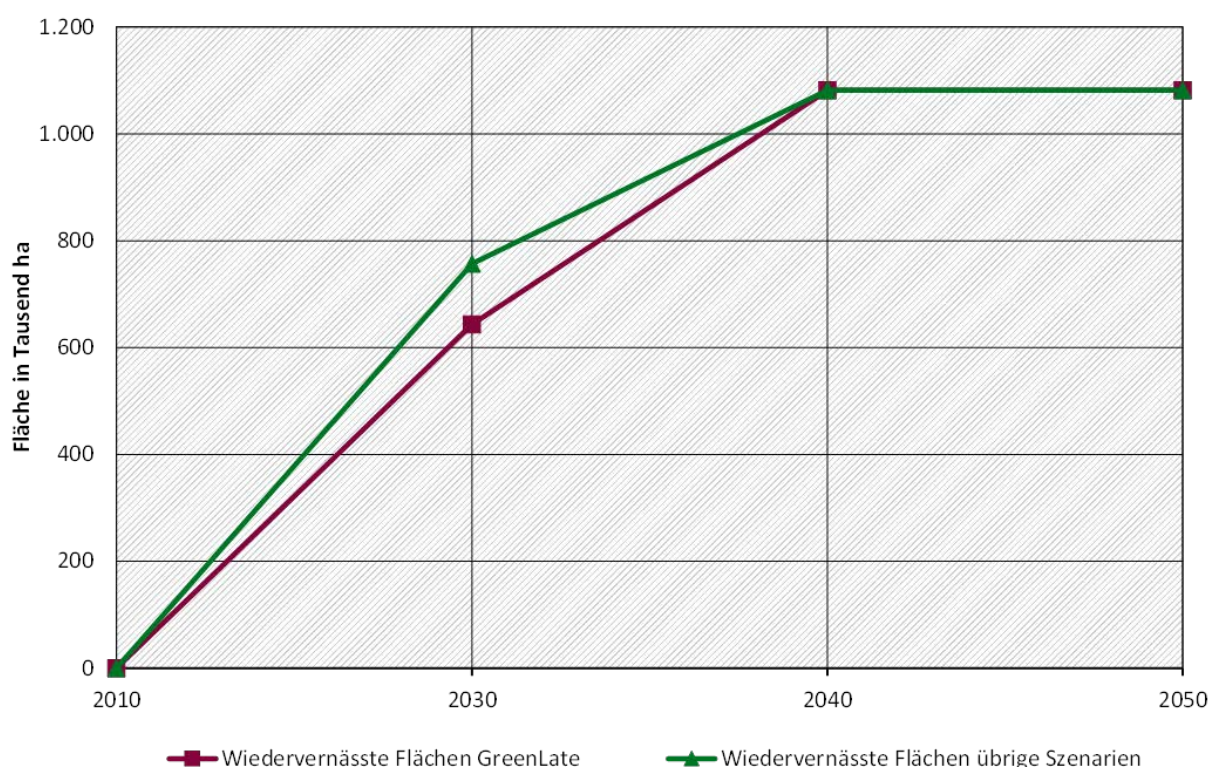
Rund 6,5 % der in Deutschland landwirtschaftlich Flächennutzung findet auf trockengelegten Mooren statt (ca. 1 Mio. ha.). Jedoch sind ca. 92 bis 97 % der CO<sub>2</sub> Emissionen der landwirtschaftlichen Böden auf diese Fläche zurückzuführen (UBA, 2019b). Daher ist eine der wirksamsten Maßnahmen in der Landnutzung, trockengelegte Moore wiederzuvernässen.

Als wirksame Klimaschutzmaßnahme wird mit Ausnahme des GreenLate Szenario davon ausgegangen, dass 5 % der landwirtschaftlichen Fläche auf trocken gelegten Moorböden jährlich ab 2020 restauriert werden. Ziel ist es 2050 lediglich circa 180.000 ha siedlungs- und infrastrukturnahe ehemalige Moorflächen zu nutzen. Hierdurch sinken die Treibhausgasemissionen ab 2040 auf 4 Mio. t. Im GreenLate-Szenario spiegelt die Wiedervernässung der Moore das szenariospezifische geringereAmbitionsniveau zu Beginn des Pfades wieder. Bis 2021 sind ca. 100.000 ha Moor wiedervernässt. Von 2022 bis 2030 wächst die wiedervernässte Fläche ebenfalls jedes Jahr um 5 %. Die Zielerreichung wird somit auch in diesem Szenario bis 2040 gewährleistet (Abbildung 5-117). Die daraus entstehenden Einschränkungen für die landwirtschaftliche Produktion werden durch eine Abnahme der Tierbestände berücksichtigt. Um noch bestehende Moore zu erhalten und renaturieren zu können, werden Torfprodukte schrittweise vollständig durch alternative Substrate ersetzt und damit der Torfabbau bis 2040 gestoppt.

---

<sup>124</sup> Bei Getreide, Kartoffeln und Zuckerrüben besteht ebenfalls ein Selbstversorgungsgrad von über 150 %. Auf Anpassung bei diesen Erzeugnissen wird jedoch verzichtet.



**Abbildung 5-117: Verlauf der Wiedervernässung von organischen Böden bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### TextBox 5-15: Restemissionen der wiedervernässten Moorböden

Bei der Wiedervernässung der Moore sind die verbleibenden Restemissionen aus Mooren zu beachten. Hier gibt es ein bislang nicht berücksichtigtes Attributionsproblem, so dass die Emissionen aus wiedervernässten Mooren nicht auf Null reduzierbar sind.

Im Laufe der Arbeiten dieser Studie, wurden die UNFCC-Berichterstattungsrichtlinien aktualisiert und ergänzt. Teil dieser Erneuerung ist die Feststellung, dass auch naturnahe Moore in netto THG emittieren (Niedermoores ca. 10 t CO<sub>2</sub>Äq/ha/a, Hochmoore ca. 3 t CO<sub>2</sub>Äq/ha/a) (IPCC, 2014a). Das heißt, selbst bei einer vollständigen Renaturierung von Moorböden bestehen immer noch Restemissionen. Wiedervernässung ist dementsprechend nicht vergleichbar mit natürlichen Mooren. Da nicht alle Moore tiefentwässert sind, bedeutet das im besten Falle, dass rund 2/3 der heutigen THG-Emissionen aus den Mooren eingespart werden können.

Zwar sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen vollständig minderbar bzw. wird eine netto Aufnahme von CO<sub>2</sub> wiederhergestellt. Jedoch steigen die Methanemissionen durch die Wiedervernässung.

Es ist allerdings möglich die Methanemissionen zum Teil bis komplett auszugleichen. Durch den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen auf den wiedervernässten Flächen (z. B. Schilf) und die langfristige stoffliche Nutzung dieser Rohstoffe ist es möglich ca. 3 bis 6 t Kohlenstoff pro Hektar und Jahr aus der Atmosphäre zu entziehen.

Die Änderungen in der Berichterstattung, und insbesondere die daraus entstehenden Kenntnisse zur Netto-Bilanzierung von wiedervernässten organischen Böden, erfolgten erst im Laufe der Arbeiten dieser Studie und konnten daher nicht mehr in den Green-Szenarien berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass in sämtlichen THG-Emissionsergebnisdarstellungen diese THG-Emissionen nicht enthalten sind. Die verbleibenden THG-Emissionen auf wiedervernässten Böden

liegen in einer Höhe von ca. 15 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Andererseits hat eine Berücksichtigung dieser Restemissionen nur eine minimale Auswirkung auf die Zielerreichung. Zum Beispiel im GreenSupreme Szenario würden sich die Minderungen gering auf 98,5 % im Vergleich zur bisherigen Berechnung von 99,2 % in 2050 ggü 1990 reduzieren, vergleiche Tabelle 6-2. Im optimistischen Fall (siehe Kapitel 6.1.2.3) wäre weiterhin eine netto Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre möglich. In GreenSupreme würde sich die THG-Minderung in 2050 gegenüber 1990 von 103,8 % auf 103,1 % reduzieren.

### 5.7.11 Flächenneuinanspruchnahme

Um unter anderem den weiteren Druck auf die land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen zu minimieren, sinkt die Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr schrittweise. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenMe auf etwa 20 ha pro Tag in 2030 und bis 2050 netto auf 0 ha. In den Szenarien GreenLife und GreenSupreme wird 2030 bereits eine Flächenneuinanspruchnahme von 10 ha/Tag erreicht, welche anschließend linear bis 2050 auch auf netto 0 ha sinkt. Grund für die schnellere Zielerreichung in diesen zwei Szenarien sind die nachhaltigeren Lebensstile und die damit verbundene Reduzierung der Wohnfläche (vgl. Kapitel 5.3.2) und der Nachfrage nach Infrastruktur (z. B. Straßennetze). Die bereits umgewandelten Flächen auf organischen Böden emittieren in 2050 weiterhin 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq trotz des vollständigen Halts der netto Neuinanspruchnahme. GreenLife und GreenSupreme führen mit der schnelleren Zielerreichung zu ca. 2 bzw. 1 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq weniger in 2030 bzw. 2040. Hierdurch sowie durch den Verzicht auf Anbaubiomasse ab 2030, den Abbau der Viehbestände infolge der geänderten Ernährungsgewohnheiten (siehe Kapitel 5.7.7 und 5.7.8) und aufgrund des Abbaus der Exportüberschüsse (siehe Kapitel 5.7.9) werden in allen Szenarien, aber insbesondere in GreenLife und GreenSupreme Flächen frei. Dies betrifft ca. 3,2 Mio. ha Ackerland, auf denen zuvor Anbaubiomasse und Futtermittel für die Tierhaltung angebaut wurden. Für die Nutzung dieser Flächen sind verschiedene Möglichkeiten denkbar:

- ▶ **Zum Flächenausgleich bei klimawandelbedingte Ertragsausfälle**  
Im Zuge des Klimawandels sind Ertragsausfälle wegen extremer Witterungsbedingungen (z. B. Dürre, Extremniederschläge) zukünftig wahrscheinlicher. In der Studie wurde diese Wirkung nicht betrachtet. Prinzipiell besteht die Möglichkeit die frei werdenden Flächen als Ausgleichsflächen für klimawandelbedingte Ausfälle zu nutzen, auch um den Beitrag Deutschlands zur Welternährung zu gewährleisten. Da davon auszugehen ist, dass diese Flächen intensiv bewirtschaftet werden würden, ist diese Möglichkeit zu Gunsten der untenstehenden Nutzung für den Naturschutz niedriger zu priorisieren.
- ▶ **Anbau von Kurzumtriebsplantagen**  
Denkbar ist auch, die frei werdenden Flächen zum Anbau von Kurzumtriebsplantagen zur Holzgewinnung zu nutzen. Da, wie bereits beschrieben, kein Mehrbedarf an Holz bestand, wäre dies jedoch aus allen Szenarien heraus nicht sinnvoll.
- ▶ **Naturschutz**  
Die dritte Möglichkeit besteht darin, die frei werdenden Flächen zu Naturschutzzwecken und Stärkung der Biodiversität zu nutzen und als Brachflächen auszuweisen. Insbesondere in intensiv bewirtschafteten Agrarregionen gehen die Insektenbestände und damit auch die Bestände von Brutvögeln seit Jahren zurück. Mit dem Vorrang des Naturschutzes auf frei

werdenden Flächen kann diesem Trend entgegengewirkt und Rückzugsräume für Pflanzen und Tiere geschaffen werden.

Für keine dieser Möglichkeiten wurde die Wirkung auf THG-Emissionen bzw. deren mögliche Kohlenstoffsenken quantifiziert. Jedoch ist insbesondere in den letzten beiden Fällen davon auszugehen, dass zusätzliche Kohlenstoffsenken entstehen würden. Diese könnten zusammen mit der Waldkohlenstoffsenke einen wichtigen Beitrag zum Ausgleich von nicht vermeidbaren Emissionen z. B. aus der Landwirtschaft leisten.

#### **TextBox 5-16: Weitere nicht berücksichtigte Minderungsmöglichkeiten und Perspektiven in der Landwirtschaft**

Neben den beschriebenen Annahmen weitere Möglichkeiten landwirtschaftliche Treibhausgase zu mindern, welche jedoch aus unterschiedlichen Gründen nicht in die Green-Szenarien berücksichtigt wurden. Der Vollständigkeit halber werden sie im Folgenden kurz beschrieben.

##### **Nitrifikationshemmer:**

Der Einsatz von Nitrifikationshemmern (Nitrifikationsinhibitoren) ist aus Klimasicht positiv zu bewerten, denn Lachgasemissionen im Ackerbau können erheblich gesenkt werden.

Nitrifikationshemmer sind chemische Zusatzstoffe in Düngemitteln, die die Nitrifikation des Ammoniumanteils zeitlich verzögern. Stickstoff wird folglich durch die Nitrifikationsinhibitoren länger in der Ammonium-Form gehalten, um die Zeit für eine Aufnahme durch die Pflanzen zu verlängern. Auf diese Weise können im Mittel bis zu 35 % der Lachgasemissionen eingespart werden (Deutscher Bundestag, 2016; Flessa et al., 2012). Die Anwendung dieser Inhibitoren ist allerdings stark umstritten, obwohl sie bereits in der Praxis zugelassen sind. Unsicherheiten bestehen in Bezug auf die Umweltauswirkung z. B. auf Gewässer und Gewässerqualität und bezüglich der Minderungswirkung und Dauerhaftigkeit (Resistenzbildung) dieser Maßnahme. Aufgrund dieser nicht abschätzbaren Umweltwirkungen wurde in allen Green-Szenarien auf die Modellierung des Einsatzes von Nitrifikationshemmstoffen verzichtet.

##### **Fütterungszusätze:**

Auch methanmindernde Futterzusätze (Methanpille o.ä.) sowie Fütterungsmaßnahmen zur Effizienzsteigerung in der Rinderfütterung wurden in den Green-Szenarien nicht berücksichtigt. Das Potenzial der vielfältigen Fütterungsstrategien und Futterzusatzstoffe ist schwer einzuschätzen. Viele Präparate und Wirkstoffe befinden sich in der Entwicklung und Erprobung. Einige haben negative Wirkungen auf die Zusammensetzung der Futtermittel, die Tiergesundheit und die Produktqualität, sind in der EU nicht zugelassen oder haben nur in vitro eine nachgewiesene Wirkung. Die Wissenschaftlichen Beiräte beim BMEL kommen deshalb zu dem Schluss, dass das THG-Reduktionspotenzial dieser Maßnahmen gering oder nicht abschätzbar ist (WBAE & WBW, 2016). Aus diesem Grund wurde diese Treibhausgasminderungsmöglichkeit nicht berücksichtigt.

##### **Alternative Proteinquellen:**

Wenn über Zukunftsperspektiven und Lösungsräume für die Landwirtschaft in 2050 nachgedacht wird, sind alternative Proteinquellen, wie der vermehrte Verzehr von Fisch (insbesondere auf Basis herbivorer Arten), die Züchtung von Insekten für die menschliche Ernährung und als Tierfutter oder In-vitro-Fleisch, mögliche Substitute für herkömmlich produziertes, tierisches Protein. Einige dieser Option haben ein großes Potential in Hinblick auf Klima- und Umweltschutz. Diese Optionen konnten jedoch aufgrund fehlender Daten zur Haltung bzw. Herstellung und zum dafür erforderlichen Energieaufwand nicht in den Green-Szenarien berücksichtigt werden.

**Multifunktionale Landwirtschaftssysteme:**

Multifunktionale Landwirtschaftssysteme, die unterschiedliche Nutzungsarten auf der gleichen Fläche miteinander verbinden, wie bspw. Agroforstsysteme oder Streuobstwiesen werden ebenfalls als mögliche Klimaschutzmaßnahmen diskutiert. Agroforstsysteme können sich positiv auf die THG-Bilanz einer landwirtschaftlichen Nutzung auswirken, wenn dadurch Kohlenstoff gespeichert, fossile Rohstoffe eingespart und ersetzt werden. In der vorliegenden Modellierung wurden Agroforstsysteme jedoch nicht berücksichtigt. Einerseits, weil es große Unsicherheiten beim Treibhausgasminderungspotenzial und den zur Verfügung stehenden Daten gibt. Andererseits zeigen alle Green-Szenarien keinen Mehrbedarf an Holz, der über den Anbau von Agroforstsystemen oder Kurzumtriebsplantagen hätte gedeckt werden müssen. Nicht genutzte Flächen werden in den Green-Szenarien zu Naturschutzzwecken ausgewiesen.

**Vertical Farming:**

Auch das sogenannte „vertical farming“, bei dem, anstatt auf dem Feld in einem in sich geschlossenen System, Landwirtschaft in eigens dafür konzipierten mehrstöckigen Gebäuden betrieben wird, ist zumindest in Teilbereichen eine denkbare Zukunftsoption für die Landwirtschaft.

Basierend auf Kreislaufwirtschaft und Hydrokulturen unter Gewächshausbedingungen werden dabei in Gebäudekomplexen auf mehreren übereinander gelagerten Ebenen ganzjährig Früchte, Gemüse, essbare Speisepilze und Algen erzeugt. Mit diesem System ließen sich neben Flächen auch Energiekosten für den Transport von den Erzeugern zu den Konsumenten reduzieren. Gleichzeitig könnten umweltschädigende Nährstoffverluste und Pflanzenschutzmittelausträge vermieden werden. Außerdem ist die Landwirtschaft unabhängig von der Verfügbarkeit fruchtbaren Bodens und insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels, unabhängig von den Witterungsbedingungen. Auch der Druck auf die Flächen und die Verfügbarkeit von Ressourcen wie Wasser oder fruchtbarer Boden wäre geringer.

Die Mehrkosten aus dem Eigenenergiebedarf für die Herstellung, den Unterhalt und den Betrieb der Farmen muss jedoch ebenfalls berücksichtigt werden. Diese dürfen den Nutzeneffekt durch die räumliche Nähe von Produktion und Konsum nicht nivellieren. Aufgrund fehlender Daten konnten Möglichkeiten des vertical farming jedoch nicht berücksichtigt werden.

**Regionale Produkte:**

Auch ein höherer Konsum regionaler Produkte spart THG-Emissionen. Im Vergleich zu nichtregionalen Produkten können regional erzeugte Produkte bei ähnlichen Produktionsbedingungen (z. B. gleiches Produktionssystem und gleiche klimatische Bedingungen) günstigere Klimabilanzen haben, v.a. aufgrund geringerer Transportemissionen. Im Klimaschutzgutachten der wissenschaftlichen Beiräte des BMEL (WBAE & WBW, 2016) wurde eine Schätzung vorgenommen. Demnach liegt das Treibhausgasminderungspotenzial zwischen 0,5 und 2,6 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, wenn bereits in der Ausgangssituation 14 % der konsumierten Produkte aus regionaler Produktion stammen würden. Die reduzierte Verkehrsleistung durch vermehrte Nachfrage regionaler Produkte wurde im Bereich Verkehr (Kapitel 5.4) berücksichtigt.

In den Berechnungen zur Güterverkehrsleistung wurden in der entsprechenden Gütergruppe für die Szenarien GreenLife und GreenSupreme diese Regionalisierung näherungsweise berücksichtigt.

**Emissionen aus der mobilen und stationären Verbrennung:**

In der Logik des deutschen Klimaschutzplans 2050 werden auch die Emissionen aus der mobilen und stationären Verbrennung in der Landwirtschaft dem Sektor Landwirtschaft zugerechnet und werden entsprechend in Kapitel 6.1.1.5 auch dort gemeinschaftlich thematisiert. Diese Systematik



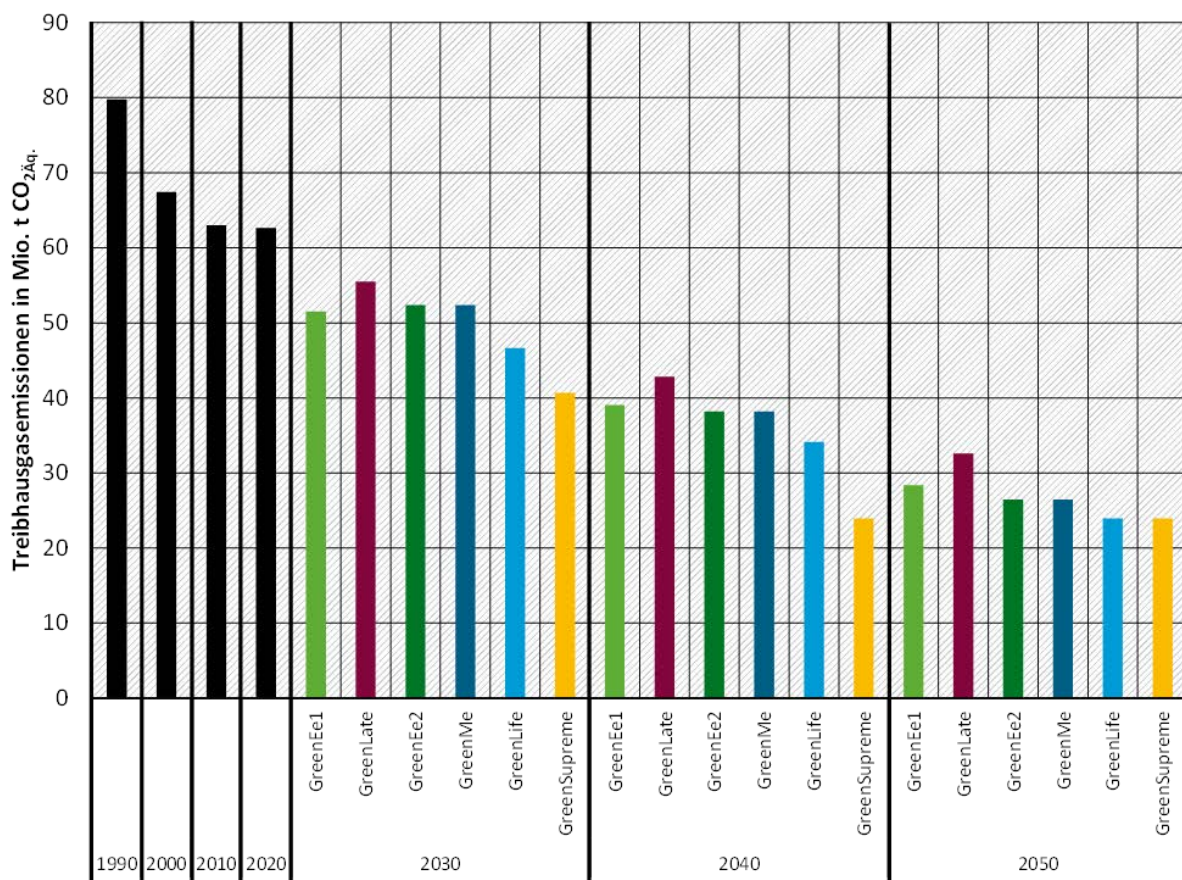
entspricht allerdings nicht der internationalen Berichterstattung. Auch im vorliegenden Projekt werden diese energetischen Bedarfe im GHD-Bereich in Kapitel 5.2.2.2 mit aufgezeigt. Die Transformation dieser Bedarfe erfolgt entsprechend der jeweiligen szenariencharakteristischen Energie- und Verkehrswende.

## 5.7.12 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

### 5.7.12.1 Landwirtschaft

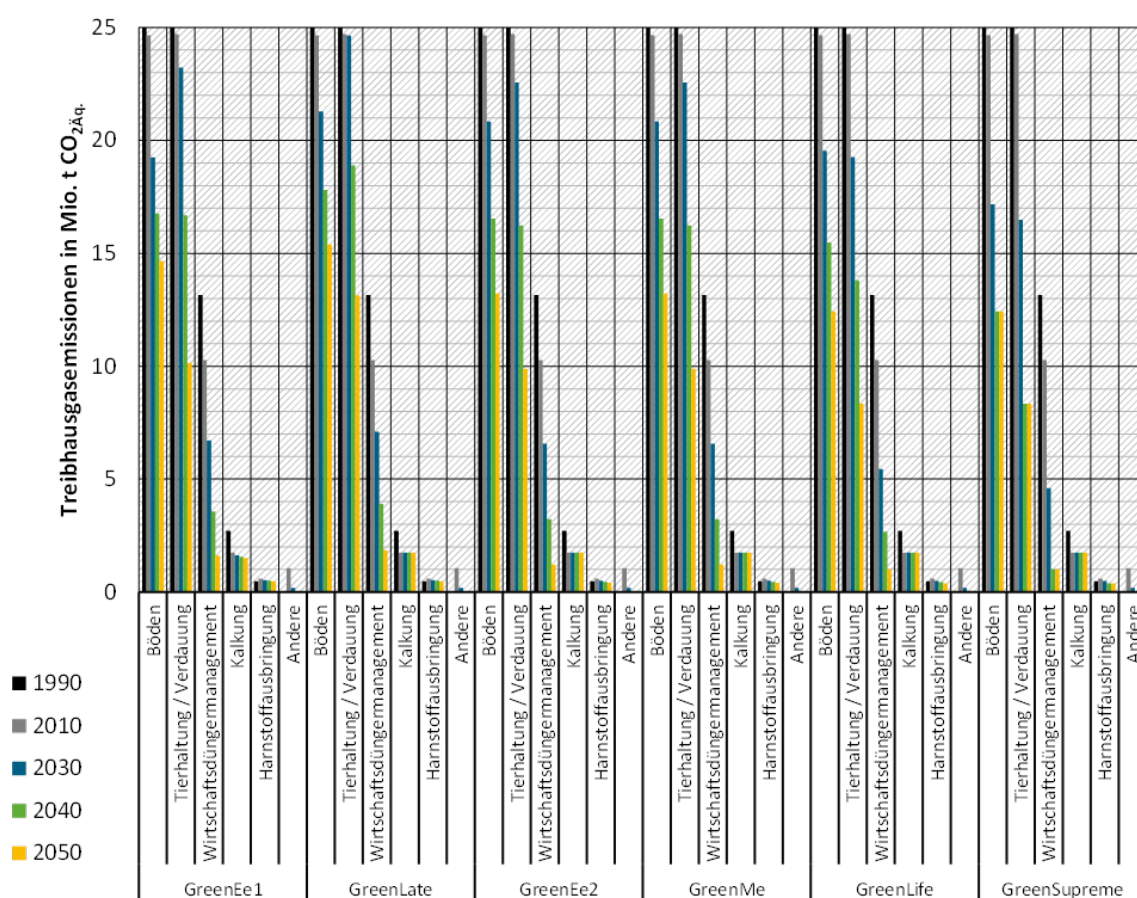
Prozesse begrenzt. In den Green-Szenarien werden Reduktionen gegenüber 1990 von 59 % in GreenLate bis 70 % im GreenLife- und im GreenSupreme-Szenario gezeigt, wie in Abbildung 5-118. zu sehen ist.

**Abbildung 5-118: Entwicklung der landwirtschaftlichen Gesamtemissionen in den Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e; UBA, 2018a)

Durch die gesündere Ernährung und Umsetzung der DGE-Verzehrempfehlung für Fleisch bei gleichzeitigem Abbau der Tierbestände und verbunden mit Produktionseinschränkungen auf einen Selbstversorgungsgrad von max. 150 %, sinken die Emissionen in der derzeit größten landwirtschaftlichen Quelle, der Tierhaltung, so weit, dass sie in GreenLife und GreenSupreme bereits 2030 erstmals geringer sind als die Emissionen aus den Böden, siehe Abbildung 5-119. In GreenLate werden die Böden erst in der Dekade nach 2040 zum Hauptemissionsverursacher, da die Tierbestände in den Kategorien Rinder, Schweine und Geflügel in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich stark und schnell reduziert werden.

**Abbildung 5-119: Quellgruppenspezifische Ergebnisse der Modellierung der Landwirtschaft**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Durch die reduzierte Tierhaltung werden Flächen freigesetzt, die zuvor dem Futtermittelanbau dienten. Betroffen sind etwa 1 Million Hektar intensiv genutzten Ackerlandes. Diese werden in allen betroffenen Szenarien als Ausgleich für Flächenverluste bei der Wiedervernässung von Mooren und für weitere Naturschutzzwecke genutzt. Optionale Nutzungen dieser Flächen werden in Kapitel 5.7.11 diskutiert.

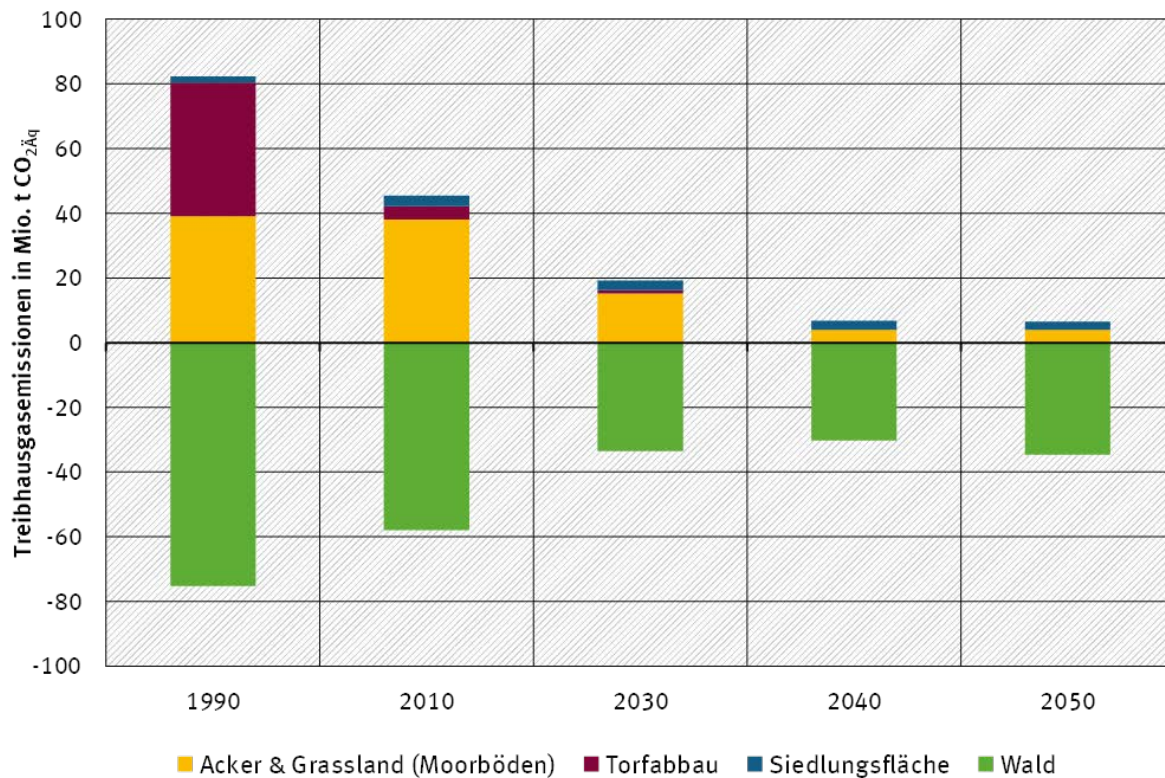
Eng verbunden mit der Tierhaltung, ist die Menge an verfügbaren Wirtschaftsdüngern. Die Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement werden in allen Szenarien durch eine vollständige Vergärung und gasdichte Abdeckung der Gärrestlager auf ein Minimum reduziert.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Treibhausgasemissionen auch in der Landwirtschaft um bis zu 70 % gegenüber dem Niveau von 1990 reduzieren lassen. Voraussetzung dafür sind jedoch maßgebliche Änderungen der Ernährungsgewohnheiten, der landwirtschaftlichen Praxis und der Exportorientierung des Sektors.

### 5.7.12.2 Ergebnisse für LULUCF

Ziel im Bereich LULUCF Sektor ist es, mindestens den Senkenerhalt zu gewährleisten und die Kohlenstoffsенке möglichst groß zu gestalten. Genau das zeigen die Szenarien. Die Quellen von Emissionen, vor allem die Nutzung organischer Böden und Torfabbau, werden von über 40 Mio. t in 2010 auf ca. 6,5 Mio. t bis 2050 reduziert, wie in Abbildung 5-120 zu sehen ist. Gleichzeitig bleibt die Kohlenstoffsенке im Wald groß genug, um diese restlichen Emissionen um das Fünffache auszugleichen. Nach dem Naturschutzszenario des WEHAM Models (Oehmichen et al., 2018) entnimmt der Wald in 2050 noch ca. 35 Mio. t CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre.

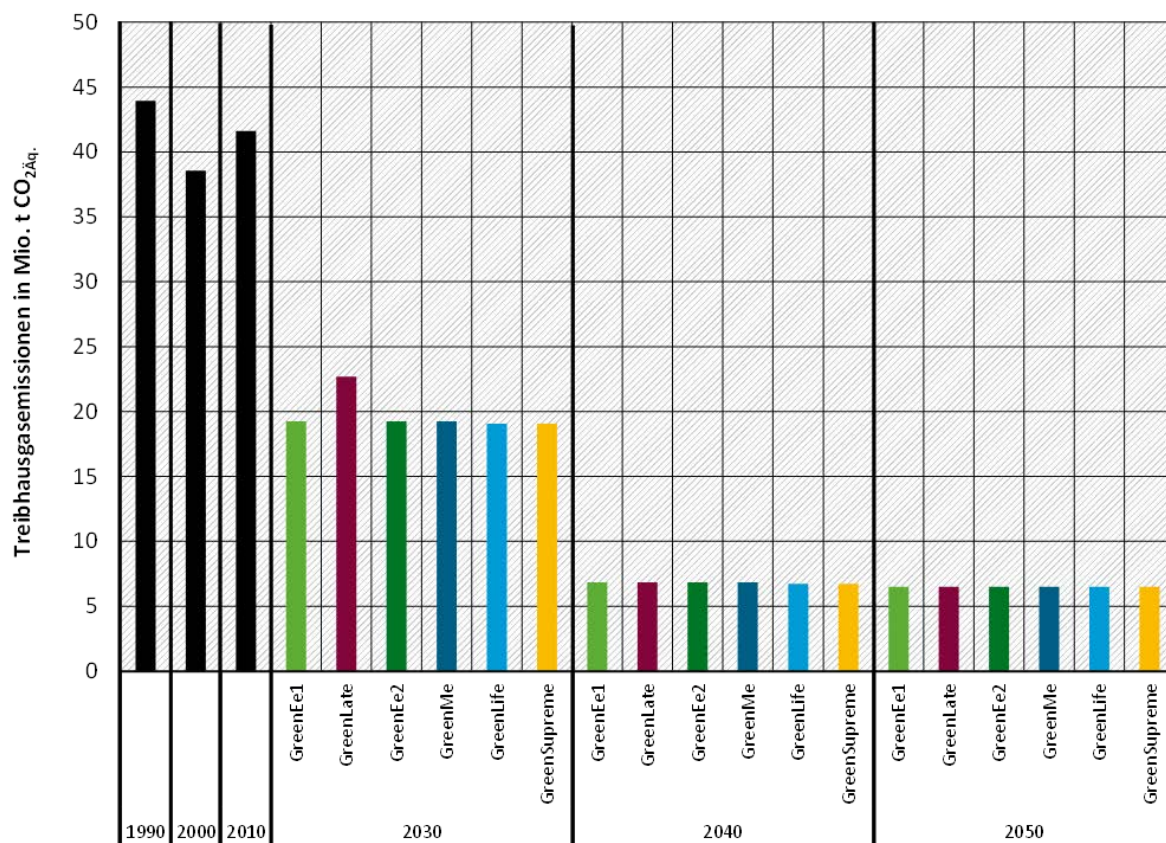


**Abbildung 5-120: Treibhausgasemissionen der Landnutzung im GreenEe1-Szenario<sup>125</sup>**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a)

Wegen der erhöhten Kaskadennutzung und durch die Reduzierung der energetischen Nutzung von Frischholz, ist es in allen Green-Szenarien möglich, genug Holz als Rohstoff für die stoffliche Nutzung zu produzieren und gleichzeitig den Naturschutz und den Schutz der Biodiversität zu verstärken (vgl. auch Kapitel 5.3.6). Durch die Wiedervernässung von insgesamt 80 % der organischen Böden, ist es in allen Szenarien möglich, die größte Emissionsquelle des LULUCF Sektors von ca. 38 Mio. t in 2010 auf 4 Mio. t bis 2050 zu reduzieren. Im Szenario GreenLate entstehen wegen der verspäteten Wiedervernässungsmaßnahmen höhere Emissionen bei den organischen Böden bis 2030, siehe Abbildung 5-121. Diese werden aber vor 2030 beschleunigt, so dass die THG-Emissionen ebenfalls auf 4 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq bis 2040 reduziert werden. In Ergänzung zu organischen Böden ist die vollständige Einstellung des Torfabbaus in allen Szenarien, dessen Emissionen von über 4 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq bis 2040 auf null reduziert werden, eine wichtige Stellgröße.

<sup>125</sup> Auf die Darstellung aller Szenarien wird hier verzichtet, da Abweichungen zwischen den Szenarien grafisch kaum darstellbar sind. Zum Vergleich der Szenarien wird auf Abbildung 5-121 verwiesen.

**Abbildung 5-121: Vergleich der Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien im Bereich Landnutzung (LULUCF) ohne Wald**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Obwohl die Versiegelung in allen Szenarien bis 2050 gestoppt werden kann, bleiben ca. 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Emissionen von Siedlungen bestehen. Ursache sind die weiterhin andauernden Emissionen trockengelegter Moorböden auf diesen Flächen. In den Szenarien GreenLife und GreenSupreme findet eine beschleunigte Reduzierung der Emissionen aus Siedlungsfläche statt, jedoch bleiben in 2050 ebenfalls Restemissionen in Höhe von 2,5 Mio. t bestehen. Da der Unterschied zwischen den Szenarien lediglich ca. 200.000 t in 2030 und 100.000 t in 2040 beträgt, sind diese in der Abbildung 5-121 kaum ersichtlich.

Ohne Wald ist der LULUCF Sektor in allen Szenarien auch 2050 noch eine Quelle von 6,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Mit dem Wald werden durch den LULUCF Sektor der Atmosphäre jedoch netto ca. 28,5 Mio. t CO<sub>2</sub> entzogen, der LULUCF Sektor stellt also eine bedeutende Senke im Jahr 2050 dar. In Abbildung 5-120 wird aber offensichtlich, dass sich die Kohlenstoffsенке im Wald seit 1990 sehr stark reduziert. Zum größten Teil ist das ein Ergebnis der heutigen Altersklassenstruktur des Waldes. Diese Struktur ist zurzeit nicht ganz ausgewogen, sondern viele Bestände sind sehr alt und mittlerweile hiebsreif. Insbesondere alte Nadelholzbestände sind durch ihre homogene Arten- und Strukturzusammensetzung und aufgrund ihres hohen Alters anfällig für natürliche Störungen wie Insektenbefall und Feuer. In diesen Beständen ist eine höhere Ernte in den nächsten Dekaden zu erwarten. Deswegen ist in allen WEHAM Szenarien (Oehmichen et al., 2018) eine weitere Reduzierung der Kohlenstoffsенке im Wald bis 2050 zu erwarten. Im Naturschutzszenario der WEHAM Szenarien, welches für die Green-Szenarien als Basis dient, ist diese weitere Reduzierung am geringsten. Ab 2040 ändert sich der Trend sogar und die Senke wächst wieder.



Dennoch erweisen sich die stofflich genutzten Holzprodukte im Naturschutzszenario des WEHAM als eine Quelle von Emissionen, und zwar in Höhe von ca. 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Diese Entwicklung entsteht, weil mehr Holz (z. B. als Abfall oder durch Verbrennung) dem Holzproduktspeicher verlässt als durch neue Holzprodukte nachgeliefert wird. Es war im Rahmen der Green-Szenarien jedoch nicht möglich, die Effekte der geänderten Holzproduktspeicher genauer zu berechnen. Trotzdem ist eine starke Abweichung von WEHAM an dieser Stelle zu erwarten. In den Green-Szenarien werden die 2,5 Mio. t nicht als Emissionen angerechnet, weswegen sie auch nicht in der Abbildung 5-121 berücksichtigt wurden. Grund für die zu erwartenden Unterschiede sind einige Abweichungen in Annahmen und Maßnahmen in den Green-Szenarien, insbesondere:

- ▶ die starke Reduzierung der energetischen Nutzung von Holz,
- ▶ die erhöhte Effizienz (z. B. weniger Verschnitt)
- ▶ und die verstärkte stoffliche Nutzung von Holz (u. a. erhöhtes Recycling von Altholz).

Diese Faktoren sind in Tabelle 5-29 zusammengefasst. Für eine genauere Betrachtung dieser Daten, siehe Kapitel 6.1.2.3. Einerseits ist zu erwarten, dass die Holzentnahme reduziert wird, was sich zugunsten der Waldkohlenstoffsенке auswirkt (aber in den Szenarien nicht mitberechnet wurde). Andererseits wird die Holzentnahme fast ausschließlich stofflich verwendet. Dazu erhöht sich die Nutzungsdauer in manchen Szenarien durch eine Erhöhung des Altholzrecyclings von 25 auf 50 % (ca. 2 auf 4 Mio. t). Damit ist zu erwarten, dass die Emissionen der Holzprodukte im WEHAM Naturschutzszenario ausgeglichen werden, wenn sie nicht sogar eine netto Senke darstellen, siehe Kapitel 6.1.2.3.

**Tabelle 5-29: Überblick zu den Annahmen des Holzproduktspeichers der Green-Szenarien und des Naturschutzszenarios der WEHAM-Szenarien**

Annahmen WEHAM	2010	2050
Holzproduktemissionen nach WEHAM Naturschutzszenario	-4 Mio. t CO <sub>2</sub> Äq	2.4 Mio. t CO <sub>2</sub> Äq
Rohholzpotalential nach WEHAM Naturschutzszenario	86 Mio. m <sup>3</sup>	76 Mio. m <sup>3</sup>
Annahmen der Green-Szenarien	2010	2050
Inländische Holzentnahme	26,1 Mio. t	11,4 Mio. t (10,4 Mio. t zusätzlich verfügbar)
Stoffliche Verwendung	5,3 Mio. t	11,4 Mio. t
Effizienzsteigerung (z. B. weniger Verschnitt)	0	+1,2 %

Annahmen WEHAM	2010	2050	
Stoffliche Verwendung von Altholz	25 %	GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife	25 % (ca. 2 Mio. t)
		GreenMe und GreenSupreme	50 % (ca. 4 Mio. t)
Werkstoffliche Recyclingquote	46 %	GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife	65 %
		GreenMe und GreenSupreme	75 %

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von (Oehmichen et al., 2018) und (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 5.7.13 Schlussfolgerungen

THG-Minderungsziele sind in der Landwirtschaft grundsätzlich nur mit großen Anstrengungen erreichbar. Sie können aufgrund physiologischer Prozesse nicht auf Null reduziert werden, daher wird der relative Anteil der landwirtschaftlichen Emissionen an den Gesamtemissionen steigen.

- ▶ Mit rein technischen und weitgehend ausgeforschten Minderungsmaßnahmen (Effizienzsteigerung, Güllevergärung, etc.) lassen sich die Emissionen zu rund 20 bis 25 % senken. Dies sollten daher rasch umgesetzt werden.
- ▶ 60 % der landwirtschaftlichen Emissionen stammen aus der Viehhaltung. Der Abbau der Tierbestände spielt daher eine Schlüsselrolle für einen wirksamen Klimaschutz in der Landwirtschaft und Landnutzung.
- ▶ Dafür muss der Konsum tierischer Produkte auf eine gesunde Menge reduziert werden – die Empfehlungen der DGE werden hierfür zu Grunde gelegt. Konsumbezogene Maßnahmen werden nur längerfristig umsetzbar sein und stellen das größte Konfliktpotenzial dar. Zusätzlich müssten die Fleischexporte reduziert werden.
- ▶ Eine Reduktion der Tierbestände – insbesondere erreicht durch eine Abstockung in Regionen mit besonders intensiver Tierhaltung - wäre nicht nur dem Klimaschutz dienlich, sondern hätte darüber hinaus positive Effekte auf Biodiversität und auf Luft- und Gewässerqualität. Darüber würde die Abhängigkeit von Futtermittelimporten verringert und damit der virtuelle Flächenimport reduziert.
- ▶ Weiterhin sind andere THG-Minderungsmaßnahmen erst durch die Viehreduzierung möglich. Um die trockengelegten Moore wieder zu restaurieren, muss 6,5 % der landwirtschaftlichen Fläche aus der Nutzung genommen bzw. in Paludikultur umgewandelt werden. Damit können 80 % der Emissionen aus Acker- und Weideland reduziert werden. Ohne die Tierproduktion zu reduzieren, ist dieses Ziel jedoch nur schwer zu erreichen.

- ▶ Außerdem wird durch den Abbau der Tierbestände mehr Spielraum für weitere Landnutzungsmaßnahmen ermöglicht. Mit den freiwerdenden Flächen könnte mehr Raum z. B. für biologische Landwirtschaft oder Naturschutz geschaffen werden.
- ▶ Eine naturnahe Bewirtschaftung des Waldes ist sowohl für Naturschutz als auch für Klimaschutz und Klimaanpassung notwendig. Um die Kohlenstoffsенke im Wald zu bewahren ist ein Waldumbau dringend notwendig. Der hohe Anteil an Nadelwaldmonokulturen macht den Wald und damit den Kohlenstoffspeicher anfällig für direkte und indirekte Folgen des Klimawandels. Laubmischwälder erhöhen die Resilienz.
- ▶ Klimaschutz ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe! –Dies gilt insbesondere für die Treibhausgasemissionen, die mit unserer Nahrungsmittelproduktion verbunden sind. Die Landwirtschaft, wie auch die Verbraucherinnen und Verbraucher müssen bereit sein für Veränderungen. Der Politik kommt dabei die Aufgabe zu durch Aufklärung und einen geeigneten ordnungs- und förderrechtlichen Rahmen die nötigen Anpassungen zu initiieren und zu steuern.

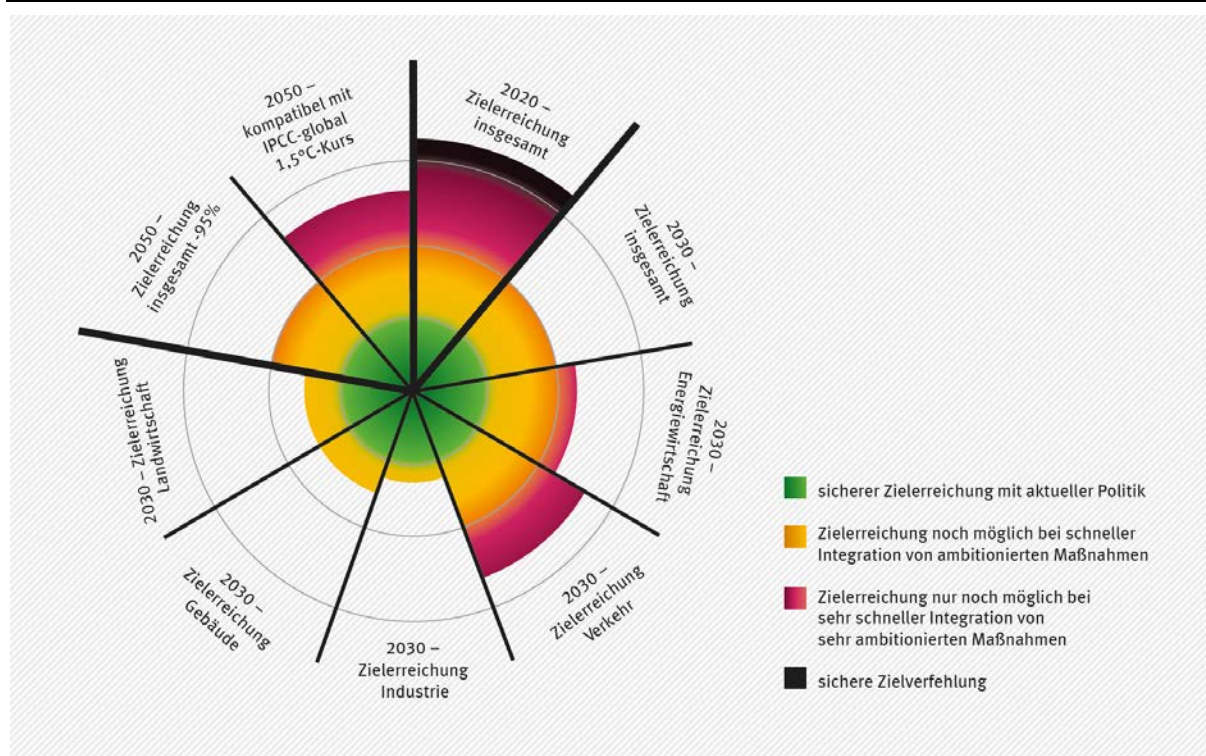
## 6 Wirkungen

Die im Kapitel 5 aufgezeigten verschiedenen Transformationspfade für die einzelnen Handlungsbereichen haben unterschiedliche Auswirkungen auf die freigesetzten Treibhausgasemissionen und die erforderliche Rohstoffinanspruchnahme im Transformationspfad hin zu einer treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Gesellschaft und werden nachfolgend detaillierter betrachtet.

### 6.1 Treibhausgasemissionen

Die derzeitigen Weichenstellungen der Bundesregierung, um die deutschen Klimaschutzziele zu erreichen sind nicht ausreichend. Sie erfüllen auch nicht die Anforderungen für einen angemessenen Beitrag Deutschlands zum Schutz unserer Lebensgrundlagen, wie in Kapitel ausführlich und in Abbildung 6-1 bzw. Abbildung 2-3 zusammenfassend dargestellt wurde.

**Abbildung 6-1: Qualitative Einschätzung der Erreichbarkeit von Treibhausgasminderungszielen im Kontext des aktuellen Trends**



Quelle: eigene Darstellung; eigene Einschätzung sowie auf Basis von (BMU, 2019b)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Treibhausgasemissionsminderungen der Green-Szenarien in die nationalen und europäischen Politiken und Ziele sowie die internationalen Erfordernisse eingeordnet.

#### 6.1.1 Sektorale Entwicklung der Green-Szenarien und Einordnung in die nationalen klimapolitischen Ziele

Jahr 2010 ein langfristiges Klimaschutzziel gesetzt, welches mit einer Reduktion von 80 bis 95 % gegenüber 1990 den nationalen Beitrag zur Einhaltung der Zwei-Grad-Obergrenze festschreibt. Die Bundesregierung hat im Klimaschutzplan 2050 (KSP) ein übergreifendes Treibhausgasminderungsziel von 55 % unter dem Niveau von 1990 festgelegt und dieses mit sektoralen Zielen unterlegt. In langfristiger Perspektive, selbst im Kontext des Pariser



Abkommens, galt bislang der Minderungskorridor von 80 bis 95 % gegenüber 1990 als Orientierungsgröße. Das Umweltbundesamt hat bereits 2016 eine Minderung von 95 % als Maßstab für eine Treibhausgasminderung im Klimaschutzplan gefordert (UBA, 2016g). Aus diesem Grund zielen alle Green-Szenarien auf eine Minderung bis 2050 von mindestens 95 % gegenüber 1990.

Der Weg dorthin kann unterschiedlich gestaltet werden. In diesem Kapitel wird ein Augenmerk auf das Zwischenziel 2030 gelegt und auf den in den Green-Szenarien aufgezeigten Lösungsraum. Dabei ist zu beachten, dass die Green-Szenarien 2030 eine Minderung über alle Emissionsquellgruppen von mindestens 55 % gegenüber 1990 gewährleisten. Die Erreichung der einzelnen sektoralen Ziele stand dabei nicht im Fokus. Gleichwohl bestand der Anspruch, dass alle verantwortlichen Bereiche Beiträge leisten müssen.

Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung sieht eine zur internationalen Berichterstattung abweichende sektorale Aufteilung vor. So werden nicht nur weniger Sektoren definiert, sondern teilweise sind Emissionsquellgruppen der Berichterstattung auch auf mehrere Sektoren im Klimaschutzplan aufgeteilt. Vor dem Hintergrund dieser methodischen Herausforderungen verbleiben geringfügige Unsicherheiten in den nachfolgend ausgewiesenen Zahlen für die Green-Szenarien.<sup>126</sup>

#### 6.1.1.1 Energiewirtschaft

Im Kapitel 5.2.6 wurden alle energiebedingten Treibhausgasemissionen über alle Anwendungsbereiche hinweg betrachtet. Der Sektor Energiewirtschaft im Klimaschutzplan 2050 umfasst hingegen alle Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger in Kraftwerken der öffentlichen Strom- und Wärmebereitstellung. Darin sind auch die Emissionen, die aus dem Stromverbrauch der Sektoren private Haushalte, Verkehr, Industrie (außer Eigenerzeugung) und GHD resultieren, enthalten. In der Energiewirtschaft soll bis 2030 eine Minderung um mind. 61 % gegenüber 1990 auf mind. 183 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> erreicht werden (BMU, 2016b). Mit den bis Mai 2019 initiierten Maßnahmen ist eine Minderung auf 263 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> absehbar (BMU, 2019b). Mit der Umsetzung der Empfehlungen der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (WSB-Kommission) kann bei entsprechendem Ausbau der erneuerbaren Energien und Effizienzsteigerungen das sektorale Ziel erfüllt werden (UBA, 2019j). Vor dem Hintergrund der zunehmenden Sektorkopplung und Integration neuer Stromverbraucher (PtX) muss die Energieversorgung einen überproportionalen Beitrag zur Treibhausgasminderung bis 2030 leisten und bei der Dekarbonisierung voranschreiten. Nur durch einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien kann in Kombination mit dem Heben von Effizienzpotentialen beim Einsatz von PtX-Techniken in den Anwendungsbereichen auch eine tatsächliche Treibhausgasminderung notwendig gefordert (siehe dazu Kapitel 5.2.1). Darüber hinaus können in der Energiewirtschaft durch die Integration erneuerbarer Energien besonders hohe Substitutionspotentiale und damit Treibhausgasminderungspotentiale erschlossen werden. Daher trägt die Energiewirtschaft in allen Szenarien überproportionaler zur Minderung bei, womit ggf. Defizite anderer Sektoren für die Zielerreichung kompensiert werden. Dies ist darüber hinaus ein wichtiger Beitrag zur Begrenzung der kumulierten

<sup>126</sup> Geringfügige Ungenauigkeiten entstehen bei der Zuordnung der CRF-Kategorie 1.A.4 bzw. der Aufteilung des GHD-Sektors in die KSP-Sektoren. In den Modellierungen wurde keine Separierung und Detailbetrachtung im GHD-Bereich vorgenommen, so dass Vereinfachungen und Abschätzungen erforderlich waren, um der KSP-Zuordnung gerecht zu werden. Konkret wurde auf Basis historischer Verteilung für 2030 näherungsweise 75 % der Kraftstoffe und die dazugehörigen Emissionen des GHD-Bereiches der Landwirtschaft zugeordnet. Darüber hinaus wurden keine Emissionen aus dem GHD-Bereich dem KSP-Sektor Landwirtschaft aus den Green-Szenarien zugeordnet. Die direkten Emissionen aus dem GHD-Sektor werden entsprechend KSP den Bereich Gebäude zugeordnet, darunter auch Militär. Durch die unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen kann daher auch bei der Einordnung der Green-Szenarien zu den KSP-Zielen im Gebäudebereich eine geringfügige Ungenauigkeit entstanden sein. Die Aufteilung der Energiewirtschaft und Industrie kann gleichfalls von derartigen Ungenauigkeiten betroffen sein. Grundsätzlich kann die Einordnung jedoch als richtungssicher beurteilt werden.

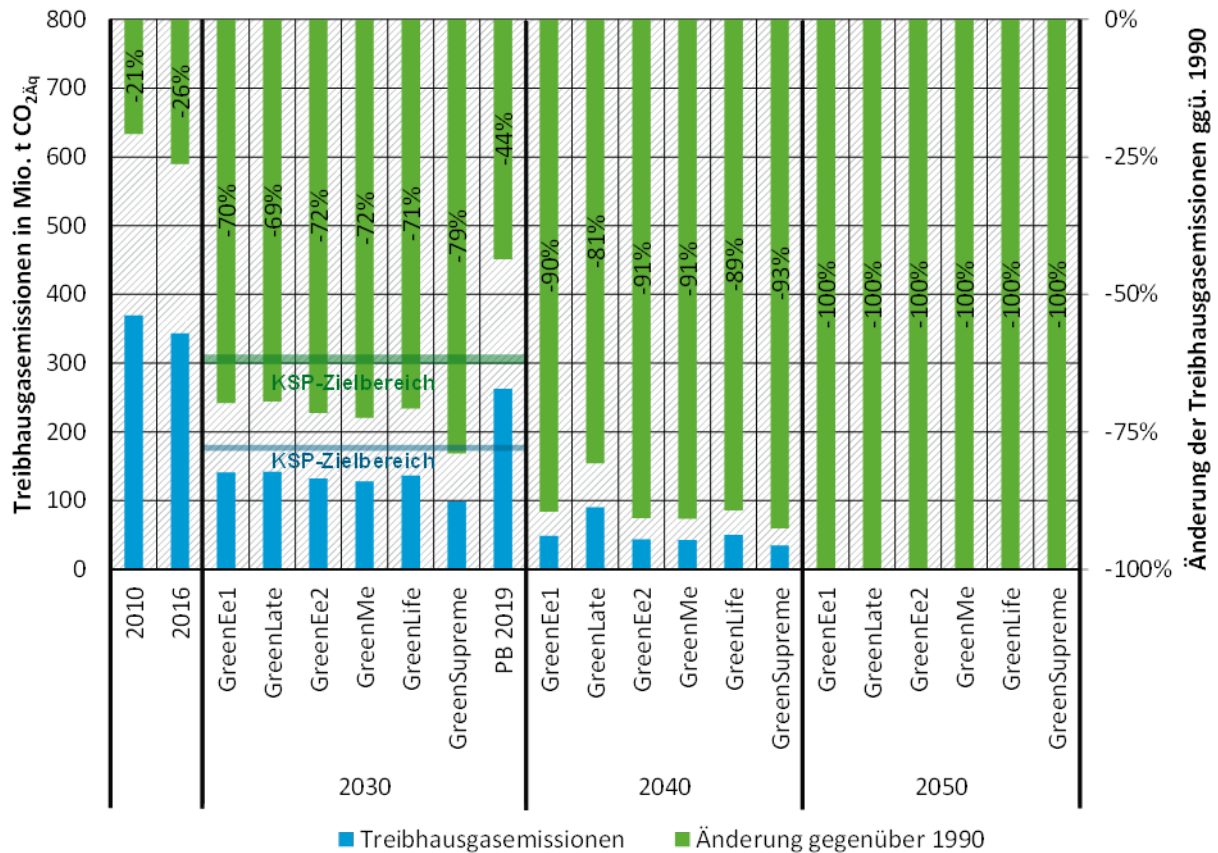
Treibhausgasemissionen und ein wichtiger Schritt zur Umsetzung des Pariser Übereinkommens. Mit einem Anteil der erneuerbaren Energien von mehr als 70 % an der Stromversorgung in 2030 liegen alle Green-Szenarien über den derzeit angestrebten Anteilen von 65 % an der Bruttostromerzeugung.

**Das sektorale KSP-Ziel für die Energiewirtschaft wird in allen Green-Szenarien 2030 sicher erreicht. Bis 2030 werden die Treibhausgasminderungen in der Energiewirtschaft vor allem von dem eingeleiteten Ausstieg und bei GreenSupreme dem vollzogenen Ausstieg aus der Kohleverstromung dominiert.** In der Dekade nach 2030 wirken die Effizienzsteigerung und Bedarfsreduktion deutlich stärker als vor 2030.

Das Szenario GreenSupreme trägt zum globalen Klimaschutz deutlich ambitionierter bei und nutzt bereits 2030 keine Kohleverstromung mehr. Der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromversorgung beträgt bereits 86 %. Dementsprechend ist der Minderungsbeitrag der Energiewirtschaft mit 79 % bis 2030 enorm. Wie in Kapitel 6.1.3 deutlich wird, ist dies für die Erreichung der internationalen Verpflichtungen notwendig. Die weiteren THG-Minderungen nach 2030 in GreenSupreme basieren auf dem fortgesetzten schnellen Ausbau erneuerbarer Energien und den Ausstieg aus den fossilen Energieträgern. Die Stromversorgung basiert 2040 in diesem Szenario bereits auf 97 % und die Brenn- und Kraftstoffversorgung auf 38 % erneuerbarer Energien, siehe auch Kapitel 5.2.6.1.

In GreenLate wird über alle Sektoren bis 2030 eine Minderung der THG-Emissionen von 55 % erreicht (siehe Kapitel 6.1.2.1). Aufgrund der geringeren Beiträge der Sektoren Verkehr, Gebäude und Sonstige muss die Energiewirtschaft überkompensieren. In Abbildung 6-2 ist der Verlauf der Treibhausgasminderung gegenüber 1990 (grün) und die verbliebenen Treibhausgasemissionen (blau) im Vergleich zu den Zielen der Bundesregierung im KSP (grüne und blaue Bereiche) dargestellt. Es ist erkennbar, dass die THG-Minderungen im Sektor Energiewirtschaft in ähnlicher Größenordnung wie in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife liegen (zwischen 69 % und 72 %). Damit wird deutlich, dass sowohl für eine sichere Zielerreichung des gesetzten Mindestziel von 55 % als auch ein ambitionierteres Vorgehen die Energiewirtschaft bis 2030 über die bisherigen Zielsetzungen hinausgehend muss und den überproportionalen Beitrag erbringen muss.

**Abbildung 6-2: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft für die Green-Szenarien bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

#### 6.1.1.2 Verkehr

Treibhausgasminderungen erreicht wurden. 2018 wurden 163 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq durch Verkehr verursacht. Dabei sind die von Deutschland am internationalen Flug- und Seeverkehr verursachten Emissionen noch nicht mit einbezogen. Bis 2030 sollen die THG-Emissionen der nationalen Verkehre um mind. 40 % gegenüber 1990 auf max. 98 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq gemindert werden (UBA, 2016g). Mit den bis August 2018 initiierten Maßnahmen ist eine Minderung auf lediglich 159,3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq absehbar (BMU, 2019b). Mit den inzwischen auf EU-Ebene beschlossenen CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerten für Pkw sowie für leichte und schwere Nutzfahrzeuge ist eine gewisse darüber hinausgehende Minderung zu erwarten, deren Wirkung in den aktuellen Projektionen noch nicht enthalten ist.

Wie in Abbildung 6-3 erkennbar ist, verfehlt das Szenario GreenLate deutlich das sektorale Ziel 2030. Gleichwohl ist das Tempo der Minderung von THG-Emissionen erheblich gesteigert, verglichen mit den vergangenen Jahren, so dass im Vergleich zu den Projektionen auf Basis der bisherigen Maßnahmen<sup>127</sup> eine deutliche Treibhausgasminderung erzielt wird. Auch in GreenLate wirken die Vermeidungs- und Verlagerungsansätze sowie die Effizienzsteigerungen bei den Techniken und dem Verkehrssystem sowohl im Personen- als auch im Güterverkehr. Darüber hinaus leisten auch die rund 4,5 Mio. Elektrofahrzeuge im Bestand des Jahres 2030 einen erheblichen Anteil zur Treibhausgasminderung.<sup>128</sup> Zudem ist nicht zu vernachlässigen,

<sup>127</sup> Stand Projektionsbericht der Bundesregierung Mai 2019 (vor dem 31. August 2018 verabschiedete Maßnahmen).

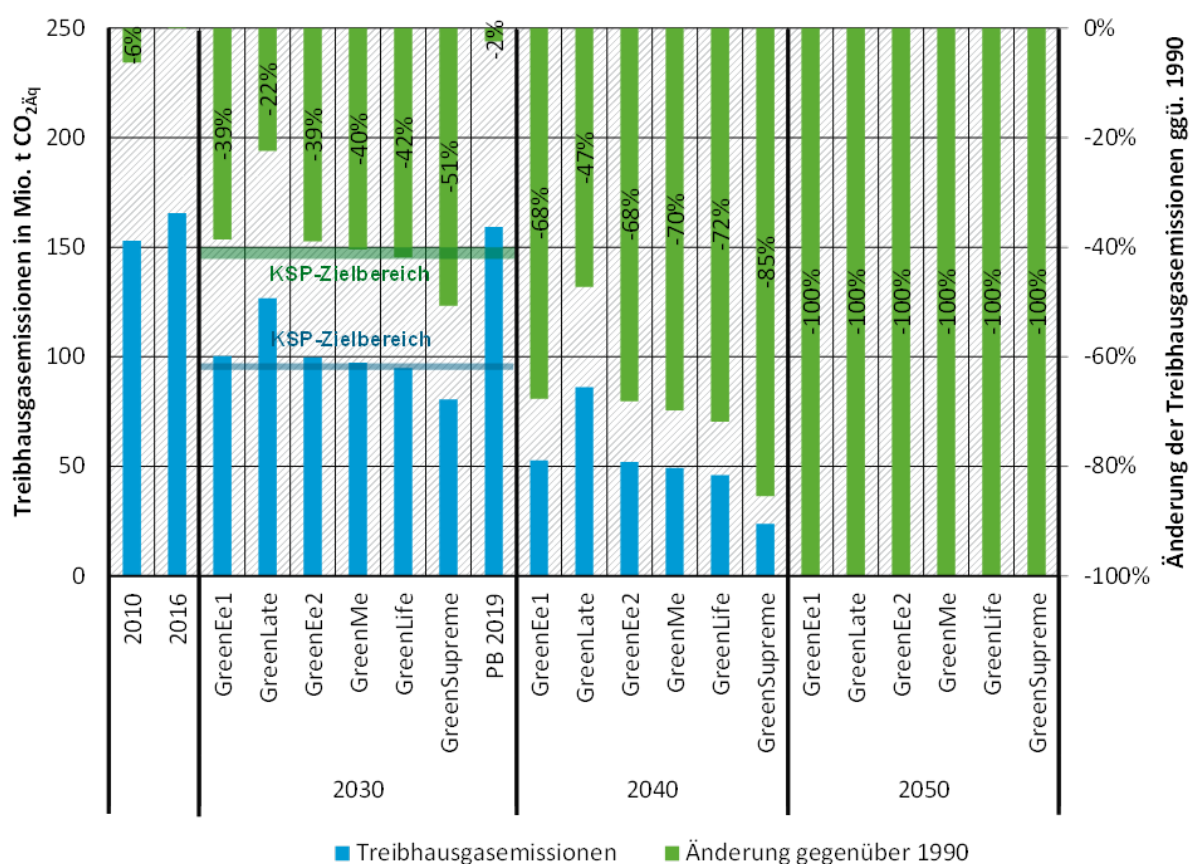
<sup>128</sup> Die Treibhausgasemissionen welche bei der Stromerzeugung für alle Verbraucher, also auch der Elektromobilität, verursacht werden sind dem Bereich Energiewirtschaft zugeordnet.

dass die Güterverkehrsleistung modellendogen ermittelt wird und damit deutlich geringer als die Verkehrsleistung im Projektionsbericht 2019 der Bundesregierung (BMU, 2019b) ausfällt.

**Die GreenEe-Szenarien verfehlen nur knapp das sektorale Ziel, während GreenMe es sicher erreicht. GreenLife übertrifft sogar die sektoralen Zielvorgaben des Klimaschutzplans in 2030.** Grund für die entsprechend starken THG-Minderungen gegenüber den Projektionen sind die in den Szenarien schnell wirkenden Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung, die dazu führen, dass die Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr zurückgeht und nicht, wie prognostiziert, weiter wächst. Ebenfalls werden neue konventionelle Fahrzeuge bis 2030 deutlich kraftstoffeffizienter gegenüber 2018. Die ca. 7,5 Mio. E-Pkw tragen weiterhin zu einer starken Minderung der THG-Emissionen bei. Auch das Szenario **GreenSupreme mit einer noch darüberhinausgehenden Ambitionssteigerung übertrifft das Sektorziel in 2030 deutlich. Dies wird durch eine stärkere Verlagerung auf aktive Mobilitätsformen sowie auf den Umweltverbund, eine schnellere Integration der Elektromobilität mit schon im Jahr 2030 gut 12 Mio. E-Pkw im Bestand, und dem Einsatz gewisser Mengen erneuerbarer PtL-Kraftstoffe im Straßenverkehr möglich.** Insbesondere der Einsatz erneuerbarer PtL-Kraftstoffe ist nur sinnvoll, wenn auch die anderen Maßnahmen mit der geschilderten Ambition umgesetzt werden. Damit wird in GreenSupreme ein wichtiger Beitrag für die Reduktion der kumulierten Treibhausgasemissionen geleistet.

2040 zeigen die meisten Szenarien eine deutliche Reduktion um rund 70 % gegenüber 1990. GreenSupreme liegt mit knapp 80 % deutlich höher. GreenLate kann erst nach 2035 das sektorale Ziel des Klimaschutzplanes für das Jahr 2030 erreichen. Die weiteren Minderungen im Zeitraum nach 2030 ergeben sich durch die weiter voranschreitende Verkehrswende und die Energiewende im Verkehr. Im Jahr 2050 ist entsprechend der Annahmen der Green-Szenarien eine vollständige Vermeidung der verkehrlich bedingten Treibhausgasemissionen erreicht.

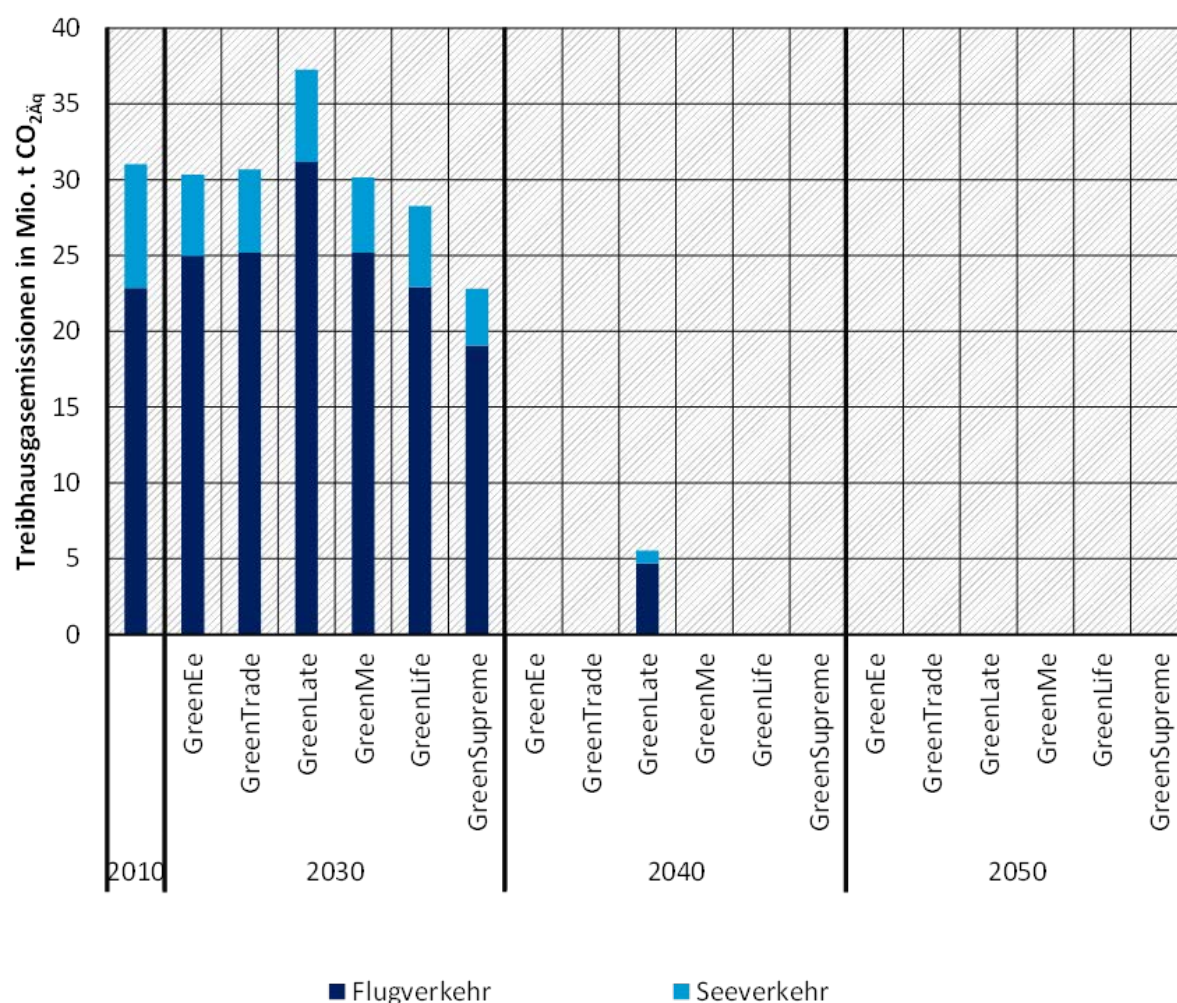


**Abbildung 6-3: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Verkehr für die Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

Diese Betrachtungen beinhalten jedoch nur die nationalen Treibhausgasemissionen, also die auf die Ziele der Bundesregierung angerechneten Treibhausgasemissionen. Nicht vernachlässigbar sind die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen, die durch den Konsum in Deutschland mit seinen globalen Handelsverflechtungen und durch internationale See- und Luftverkehre verursacht werden. Entsprechend der festgelegten Integration von erneuerbaren strombasierten Brenn-, Kraft- und Rohstoffimporten (siehe Kapitel 5.2.4) wird ab 2020 ein treibhausgasneutrales Wachstum des Flugverkehrs durch erneuerbare, strombasierte Kraftstoffe in den GreenEe-Szenarien und GreenMe gewährleistet. In GreenLife und GreenSupreme ist der gesellschaftliche Konsens zum Klima- und Ressourcenschutz bereits im alltäglichen Handeln verankert, so dass durch Verkehrsvermeidung und -verlagerung die Verkehrsleistung des Luftverkehrs bereits 2030 niedriger als in den anderen Green-Szenarien ist und damit ein wichtiger Beitrag zur Treibhausgasminderung geleistet wird. In GreenLate hingegen führen höhere Verkehrsleistungen, insbesondere im Flugverkehr, und geringere Effizienzsteigerungen zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen, da die Erschließung internationaler Standorte zur Versorgung mit erneuerbaren Kraftstoffen nur im gleichen Ausmaß wie in den übrigen Szenarien erfolgt<sup>129</sup>. Im Jahr 2040 wird bis auf GreenLate eine vollständige Versorgung der benötigten erneuerbaren Kraftstoffe erreicht und bis spätestens 2050 wird auch in GreenLate die Versorgung mit treibhausgasneutralen Kraftstoffen erreicht.

<sup>129</sup> GreenSupreme zeigt aufgrund des globalen Verständnisses zum Klima- und Ressourcenschutz im Vergleich zu den anderen Szenarien eine schnellere Erschließung von Standorten für die Versorgung mit erneuerbaren Brenn- und Kraftstoffen.

**Abbildung 6-4: Entwicklung der Treibhausgasemissionen der von Deutschland verursachten internationalen Verkehre der Green-Szenarien**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und historische Werte auf der Basis von (BMU, 2019b)

#### TextBox 6-1: Klimawirkung durch Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs

Um den Klimawandel aufzuhalten und die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, ist auch die Klimawirkung von anderen Emissionen (Nicht-THG- bzw. Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen) neben den momentan nach UNFCC berichterstattungspflichtigen Emissionen zu berücksichtigen. Sie treten z. B. im Seeverkehr als Black Carbon auf, und im Luftverkehr durch den Ausstoß von Partikeln, Wasserdampf, Schwefel- und Stickoxiden, die auf die Bildung von Aerosolen und Wolken sowie auf die Konzentrationen einiger atmosphärischer Gase Einfluss nehmen und so ebenfalls zur Änderung des Strahlungshaushaltes der Erde beitragen.

Es ist wissenschaftlicher Konsens, dass die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte des Luftverkehrs insgesamt eine strahlungsverstärkende Wirkung haben (Lee, 2018). Die Höhe der strahlungsverstärkenden Wirkung ist Gegenstand aktueller Forschung. Diese könnte jedoch insgesamt so hoch sein wie die Wirkung aus den CO<sub>2</sub>-Emissionen allein. Die resultierende Klimawirkung der Emissionen hängt u. a. ab von der Flughöhe, vom geographischen Ort, vom Zeitpunkt (Tageszeit, Jahreszeit), von der Wetterlage sowie dem physikalischen und chemischen Hintergrund<sup>130</sup> während der Lebensdauer

<sup>130</sup> Beispielsweise: Temperatur, Vorhandensein von Reaktanten.

der Emissionen. Zudem sind die Emissionsindizes der Nicht-CO<sub>2</sub>-Emissionen (mit Ausnahme von Wasserdampf) vom Flugzeugtyp abhängig. Auch die Bildung von Kondensstreifen hängt vom Flugzeugtyp ab. Damit sind die Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte für jeden einzelnen Flug unterschiedlich und damit auch ihre Beiträge zur Klimaänderung im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-bedingten Klimaänderung.

Auch bei vollständiger Umstellung der Energieversorgung des Luftverkehrs von fossilem Kerosin auf erneuerbares PtL-Kerosin würde also ein erheblicher Teil der Klimawirkung fortbestehen.

#### 6.1.1.3 Gebäude

Im Sektor Gebäude werden im Klimaschutzplan die beim Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden entstehenden Treibhausgasemissionen betrachtet. Darunter fallen insbesondere der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser, der Endenergiebedarf für die Klimatisierung sowie weitere Treibhausgasemissionen im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), darunter auch Militär. Indirekte Treibhausgasemissionen, bspw. die mit der Bereitstellung von Strom oder Fernwärme verbunden sind, werden nicht den Gebäuden, sondern der Energiewirtschaft zugeordnet.

Bis 2030 soll laut Klimaschutzplan im Sektor Gebäude eine Minderung um mind. 66 % gegenüber 1990 auf maximal 72 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq erreicht werden (UBA, 2016g). Aus Abbildung 6-5 wird deutlich, dass bereits gut die Hälfte der Minderungen gegenüber 1990 erreicht wurde. Dies fußt in großen Teilen auf den umfangreichen Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebestand der neuen Bundesländer nach der Wiedervereinigung und der dezentralen energetischen Biomassenutzung. Mit der Fortführung der bisherigen Maßnahmen<sup>131</sup> ist eine Minderung auf 82,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq absehbar (BMU, 2019b). Um das sektorale Ziel zu erreichen, sind weitere Anstrengungen erforderlich.

**Die direkten brennstoffbedingten Treibhausgasemissionen in GreenLife und GreenSupreme ermöglichen ein sicheres Erreichen des KSP-Ziel-Korridors.** Es sind jedoch entsprechend der KSP Zuordnung noch Kraftstoffe aus dem GHD-Bereich, zum Beispiel aus dem Militärbereich, mit zu berücksichtigen. Der gesamte nationale Verkehr wird in allen Green-Szenarien außer GreenSupreme erst nach 2040 mit erneuerbaren strombasierten Kraftstoffen versorgt, siehe 5.2.4. Dementsprechend entstehen weitere sektorale zu berücksichtigende Treibhausgasemissionen bis 2040 durch Kraftstoffe im GHD-Bereich. GreenSupreme erreicht mit 72 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq das sektorale Ziel für 2030 und zeigt 2040 bereits eine Reduktion von 88 % gegenüber 1990 auf. GreenLife erreicht bis 2030 eine Minderung um 64 % und würde bereits im Folgejahr sicher den Zielkorridor des KSP erreichen. GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe erreichen jeweils eine Minderung von 61,5 % und GreenLate von rund 55 %. GreenLate erzielt damit eine geringere Treibhausgasreduzierung als unter den heutigen Rahmenbedingungen<sup>132</sup> für 2030 prognostiziert wird. Hintergrund ist der angenommene Verzicht auf die energetische Nutzung von Biomasse und insbesondere die Außerbetriebnahme von ineffizienten dezentralen Holz-Heiztechniken. Dies wurde zum einen vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung aber auch vor allem aus Gründen der Luftreinhaltung unterstellt, da bei deren Betrieb zumeist mit Emissionen von Feinstaub und anderen Luftschadstoffen (UBA, 2007) verbunden ist. Die derzeitigen rechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen setzen hingegen weiterhin auf die energetische Biomassenutzung insbesondere auch mit dezentralen biogenen Heiztechniken. Damit wird zwar weiterhin die Treibhausgasreduzierung im Gebäudebereich sichergestellt, langfristig wird dies aber unter den Aspekten der Nutzungskonkurrenzen, des Naturschutzes, der Luftreinhaltung und vor dem Hintergrund natürlicher Kohlenstoffsenken als nicht

<sup>131</sup> Stand Projektionsbericht der Bundesregierung Mai 2019 (vor dem 31. August 2018 verabschiedete Maßnahmen).

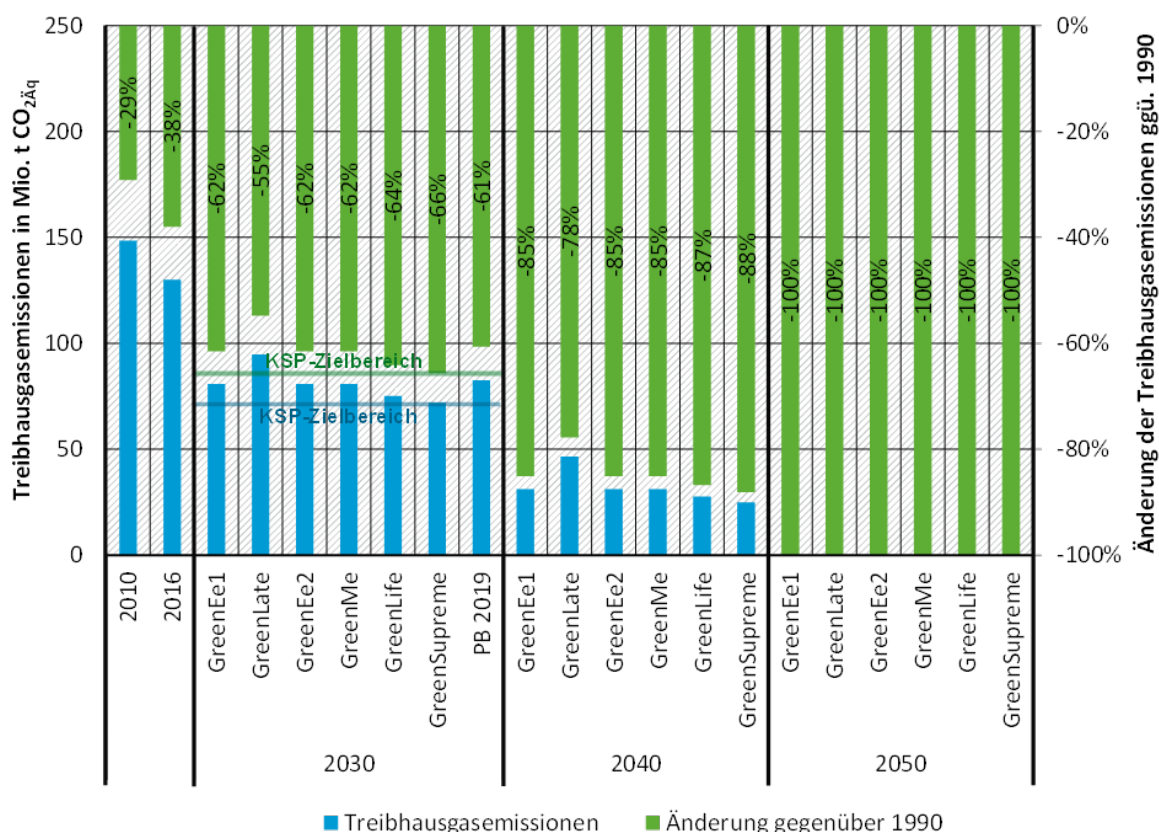
<sup>132</sup> Stand Projektionsbericht der Bundesregierung Mai 2019 (vor dem 31. August 2018 verabschiedete Maßnahmen).

vertretbar erachtet. Die Fortführung der energetischen Biomassenutzung im Gebäudebereich könnte zu Lock-in-Effekten führen. Alle Green-Szenarien skizzieren unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten abseits einer energetischen Biomassenutzung mit dem Fokus auf eine langfristig nachhaltige Entwicklung, auch wenn es insbesondere in GreenLate zu einer kurzfristigen Verzögerung bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen gegenüber den gegenwärtigen Prognosen des Projektionsberichts kommt. **Bis spätestens 2035 erreichen alle Green-Szenarien auch mit dem Ausstiegspfad aus der dezentralen Biomassenutzung die sektoralen Treibhausgasminderungen für 2030**, wobei GreenLate entsprechend der Szenariendarstellung diese Treibhausgasminderung erst in 2035 erreicht. Wie in dem Kapitel 3.1 erläutert, lag der Fokus bei der Ausgestaltung der Green-Szenarien darauf, die langfristigen Klimaschutzziele nachhaltig zu erreichen. Mit einer weiteren marginalen Steigerung bei der Sanierungsrate, zusätzlichen Maßnahmen bei der Energieeinsparung (Sanierungstiefe), einer Stärkung der erneuerbaren Wärmeversorgung, die nicht auf Brennstoffen basiert oder einem um wenige Jahre verspäteten Ausstiegspfad aus der dezentralen Biomassenutzung kann die sektorale Zielerreichung des KSP in 2030 ermöglicht werden.

Im Jahr 2040 sind die Green-Szenarien deutlich in der Treibhausgasminderung vorangeschritten. GreenSupreme mit dem hohen Ambitionsniveau bei Sanierungsrate, Sanierungstiefe und den geminderten gesellschaftlichen Bedürfnissen nach Wohnfläche verursachen nur noch 12 % der Treibhausgasemissionen von 1990. GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe erreichen Minderungen um rund 86 %. Infolge des geringeren Ambitionsniveaus in GreenLate besteht in 2040 ein höherer Endenergiebedarf. Dieser Mehrbedarf wird nahezu vollständig mit fossilem Gas bereitgestellt, siehe Abbildung 5-43. Die hierdurch verursachten Mehremissionen ermöglichen nur eine Minderung um 79 % gegenüber 1990.

Bis 2050 werden die Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude vollständig vermieden. Zum einen werden auch die Kraftstoffbedarfe des GHD-Sektors mit importierten erneuerbaren Kraftstoffen versorgt und zum anderen werden die in GreenLate verbliebenen Brennstoffbedarfe mit importiertem Methan aus Power to Gas – Anlagen versorgt.



**Abbildung 6-5: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Gebäude für die Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

#### 6.1.1.4 Industrie

Im Sektor Industrie werden sämtliche energiebedingten Treibhausgasemissionen betrachtet, welche durch die direkte Nutzung von Endenergieträgern in der Industrie entstehen sowie die rohstofflichen Treibhausgasemissionen und Treibhausgasemissionen der Produktverwendung fluorierter Gase. Wie im Sektor Gebäude werden indirekte Emissionen, bspw. die mit der Bereitstellung von Strom (Nicht-Eigenversorgung) einhergehen der Energiewirtschaft zu geordnet.

Im Jahr 2016 betrugen die Treibhausgasemissionen in diesem Sektor 188,2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, welche bis 2030 auf mind. 143 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, also um min. 49 % gegenüber 1990, reduziert werden sollen (UBA, 2016g). Mit den bis Mai 2019 initiierten Maßnahmen ist eine Minderung auf 152,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq absehbar (BMU, 2019b).

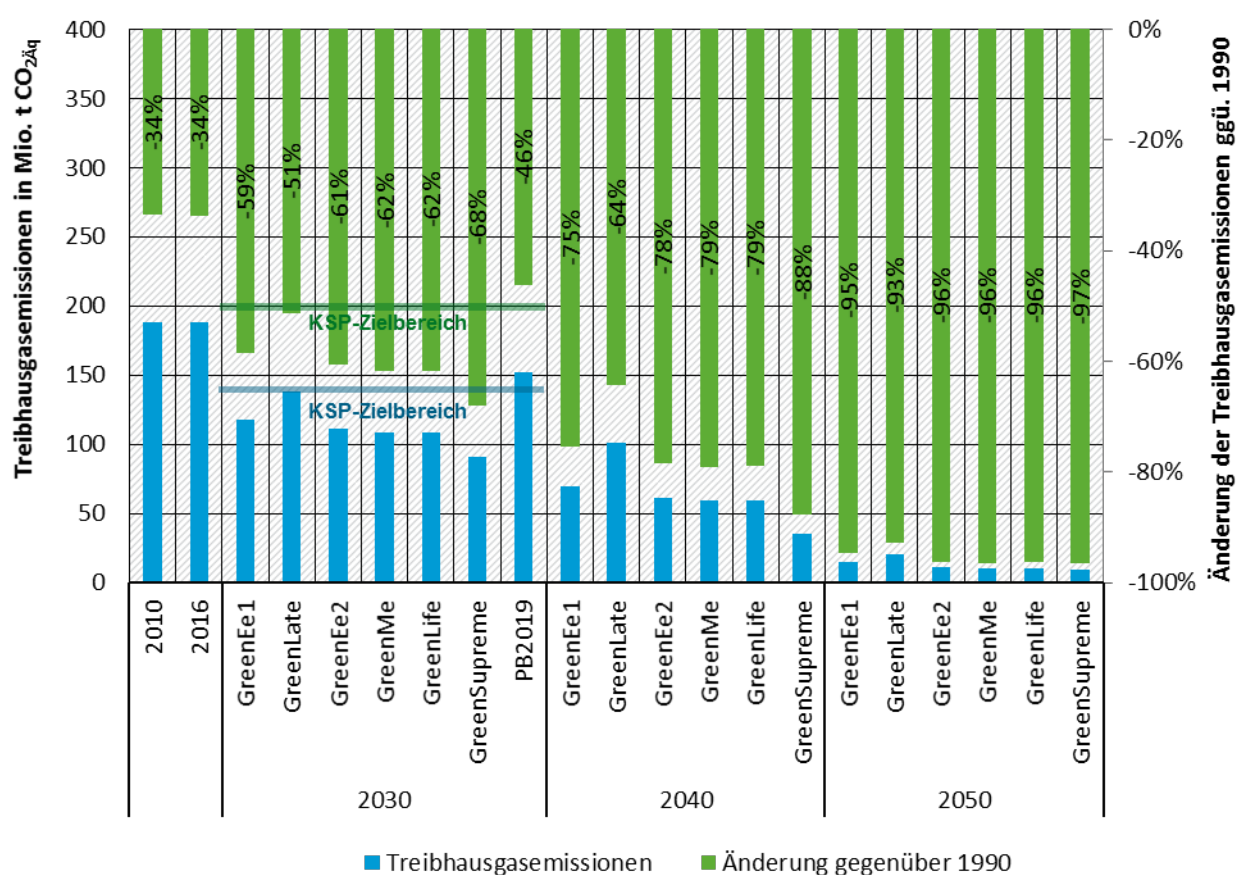
Wie in Abbildung 6-6 erkenntlich ist, gewährleisten die getroffenen Annahmen eine **sektorale Zielerreichung in allen Green-Szenarien**. Die Treibhausgasemissionen liegen 2030 immer und zum Teil deutlich unterhalb des Zielbereichs des KSP.

**Wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist eine konsequente Energieeffizienzstrategie**, die insbesondere in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife zum Tragen kommt. Hier werden Minderungen gegenüber 1990 von 59 bis 62 % erreicht.

**In GreenSupreme wird neben dem Ende der Kohleverstromung 2030 ein Ende jeglicher Kohlenutzung bis 2040 unterstellt, so dass ein wesentlicher Beitrag zur Reduktion der kumulierten Treibhausgase geleistet wird.** Insbesondere in den Branchen Stahl, Gießereien und Papierindustrie ist daher eine schnellere und ambitioniertere Prozesstransformation als in

den anderen Green-Szenarien erforderlich, siehe Kapitel 5.5. Dazu sowie ergänzend zum konsequenten Heben von Energieeinsparpotentialen erfordert dies eine frühzeitige Integration treibhausgasarmer Prozesstechniken in energieintensiven Bereichen. So liegen die Treibhausgasemissionen in 2030 und 2040 noch einmal deutlich niedriger als in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife. Bis 2030 können so bereits 68 % und bis 2040 88 % der Treibhausgase gegenüber 1990 gemindert werden. GreenLate, mit einer Minderung über alle Emissionsquellgruppe von nur etwa 55 bis 2030, weist aufgrund geringerer Effizienzbestrebungen und verzögerter Umstellung der Wasserstoffwirtschaft auf regenerative strombasierte Energieträger die geringste Treibhausgasminderung (um 51 %) auf. Beim Vergleich GreenLate und den derzeitigen Maßnahmen (Minderung um 46 %) (BMU, 2019b) ist zu beachten, dass der resultierende Unterschied sich aus unterschiedlichen Annahmen zur Wirtschaftsentwicklung ergibt und nur begrenzt durch weitere Klimaschutzmaßnahmen.

Nach 2030 erfolgt in allen Branchen die Transformation der Prozesstechniken in Verbindung mit der Erneuerung des Anlagenparks, wobei entsprechend der Szenariencharakteristik dies in GreenLate teilweise langsamer erfolgt. In allen Szenarien bis auf GreenLate erfolgt dabei eine effiziente Sektorkopplung, d. h. wo technisch möglich erfolgt die Energieversorgung strombasiert. Im Jahr 2050 sind alle energiebedingten Treibhausgasemissionen in der Industrie vollständig vermieden. Dennoch kann nach heutigem Kenntnisstand keine vollständige Vermeidung der industriellen Treibhausgase erreicht werden. **In GreenSupreme kann bis 2050 um insgesamt 97 %, in GreenEe2, GreenMe und GreenLife 96 %, in GreenEe1 95 % und in GreenLate 93 % gegenüber 1990 gemindert werden. Die verbleibenden Treibhausgasemissionen sind rohstoffbedingt bzw. prozessbedingt. Hauptverursacher sind hier die Kalk-, Zement und Glasindustrie.** Die Unterschiede bei den verbleibenden prozessbedingten Treibhausgasemissionen resultieren bspw. aus der Abhängigkeit von der Integration von alternativen Bindemitteln (siehe Kapitel 5.5.6), verändertem Konsumverhalten sowie veränderter Bauweise bei den Wohngebäuden (siehe Kapitel 5.3).

**Abbildung 6-6: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Industrie für die Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

#### TextBox 6-2: Berücksichtigung von CCU in der Treibhausgasbilanzierung

Wie in Kapitel 5.2 aufgeführt, bedarf es für die Bereitstellung von strombasierten Kohlenwasserstoffen (in PtG/PtL/PtS – Techniken) Kohlenstoff. Hierfür kann atmosphärischer und fossiler Kohlenstoff genutzt werden.

CCU in Verbindung mit atmosphärisch genutztem Kohlenstoff verursacht keine zusätzliche Treibhausgaswirkung und wird in der Studie bei den Treibhausgasbilanzen nicht mitbilanziert.

Die nach heutigem Kenntnisstand nicht vermeidbaren Treibhausgasemissionen (fossiler Kohlenstoff) der industriellen Produktion könnten für die Produktion von kohlenstoffhaltigen PtG/PtL/PtS-Produkten genutzt werden (CCU). Die Modellergebnisse weisen zwar geringe aber dennoch vorhandene nationale Produktionen aus, so dass in Kombination mit einer Kohlenstoffinfrastruktur dieser fossile Kohlenstoff in Deutschland wiedergenutzt werden könnte.

CCU in Verbindung mit fossilem Kohlenstoff wird in der Studie beim Quellverursacher bilanziert. Dies geschieht aus zwei Gründen: Zum einem kann so fortwährend ein Anreiz gesetzt werden alternative Verfahren und Prozesse zu entwickeln, die zu keinen vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen führen. Zum anderen ist eine konkrete Nachverfolgung des fossilen Kohlenstoffs bzw. sektorale Zuordnung nicht mehr vollständig möglich. Die strombasierten kohlenstoffhaltigen Energie- und Rohstoffträger stehen allen Nutzern aller Anwendungsbereiche zur Verfügung. Dementsprechend verteilt sich der fossile Kohlenstoff in Abhängigkeit der unterschiedlichen Nutzer. Konkret bedeutet dies: Wenn im Jahr 2050 fossiler Kohlenstoff aus

verbliebenen prozessbedingten industriellen Treibhausgasemissionen zur Produktion von strombasiertem Gas (PtG) verwendet wird, so gelangt auch ein Großteil dieses Kohlenstoffs wieder in die Industrie, da dieser Bereich Hauptverbraucher von Gas ist. Grundlegend wäre fossiler mit CCU genutzter Kohlenstoff bei der Bereitstellung von gasförmigen Energieträgern in den KSP-Sektoren Industrie, Energie und Gebäude sowie ggf. auch Verkehr und Landwirtschaft wiederzufinden und bei Kraftstoffen in den KSP-Sektoren Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft wiederzufinden.

In der Gesamtbilanz über alle Sektoren ergeben sich keine Auswirkungen dieser Bilanzierungssystematik. Es würde nur zu einer Verschiebung innerhalb der Bilanzgrenzen zwischen energiebedingten und rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen kommen.

#### 6.1.1.5 Landwirtschaft

Der Sektor Landwirtschaft<sup>133</sup> umfasst neben den Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Landwirtschaft auch die direkten Emissionen zum Ausführen des landwirtschaftlichen Betriebs, wie bspw. die Kraftstoffe landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Im Jahr 2016 betrugen die sektoralen Treibhausgasemissionen 71,8 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Bis 2030 soll eine Minderung um mind. 31 % gegenüber 1990 auf maximal 61 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq erreicht werden (UBA, 2016g). Unter den bisherigen Rahmenbedingungen<sup>134</sup> ist eine Minderung auf 67,4 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq absehbar (BMU, 2019b). Das Ziel würde demnach um 6,4 %-Punkte verfehlt werden, so dass es weiterer Maßnahmen bedarf.

**Mit den in den Green-Szenarien unterstellten Maßnahmen wird die sektorale Zielerreichung bis 2030 sicher gewährleistet.** Selbst GreenLate erreicht mit 60,95 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq die geforderten Minderungen. **In allen Green-Szenarien wirkt bereits 2030 die veränderte gesündere Ernährung, die sich in den reduzierten Tierbestandszahlen widerspiegelt.** Gleichwohl kommt dies in GreenLate nur im geringen Maße bis 2030 zum Tragen. In GreenLife und insbesondere GreenSupreme schreitet dieser gesellschaftliche Wandel schneller voran, so dass diese Szenarien in Kombinationen mit den technischen Maßnahmen bereits 2030 eine Minderung um 42 % bzw. 49 % gegenüber 1990 erreichen, wie in Abbildung 6-7 zu sehen ist. Bis 2040 schreitet insbesondere GreenSupreme voran, was im wesentlichen auf die schnellere Reduktion der Tierbestandszahlen und den damit verbundenen Folgewirkungen (bspw. Wirtschaftsdüngemanagement) zurückzuführen ist. In 2050 erreichen GreenEe2 und GreenMe eine Minderung gegenüber 1990 um rund 70,6 %. GreenSupreme und GreenLife sind vor dem Hintergrund des geringeren Milch- und Fleischkonsums und den entsprechenden Folgewirkungen noch ambitionierter und ermöglichen eine Minderung um 73,4 %, siehe auch Kapitel 5.7.

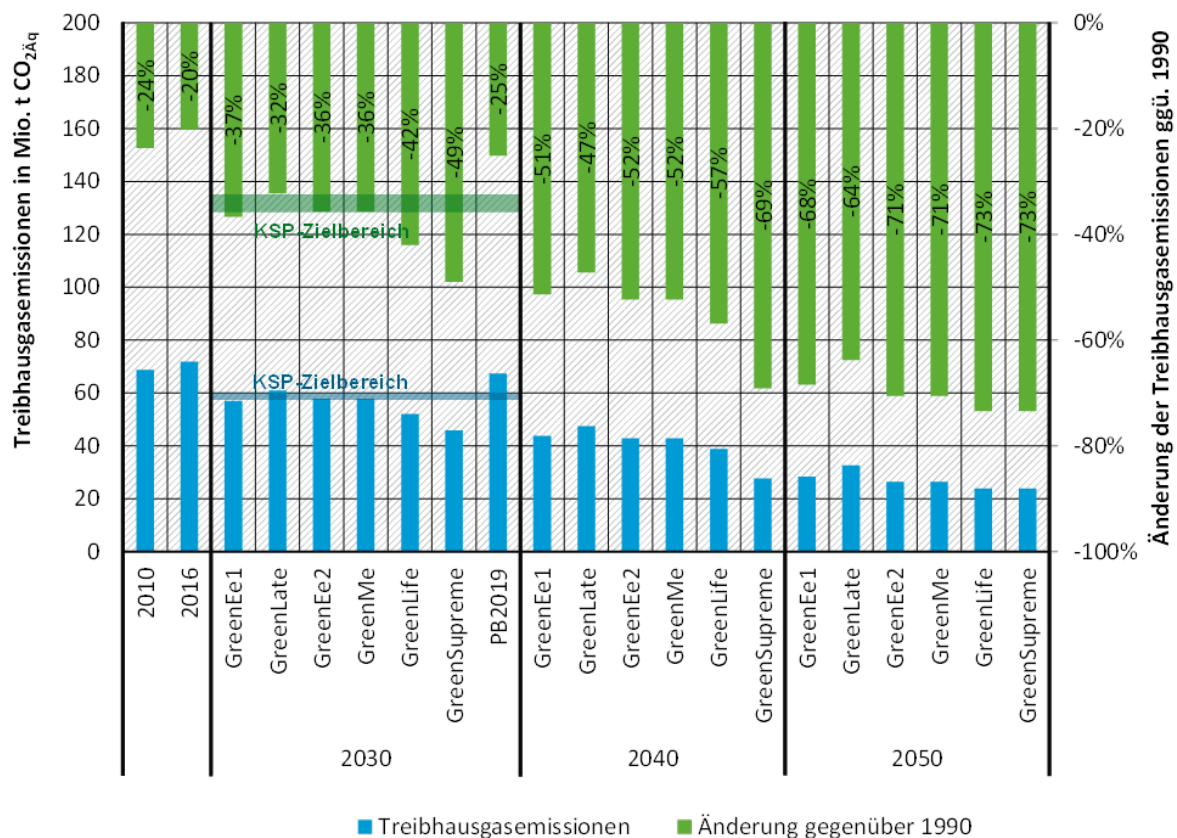
In allen Szenarien tragen die Kraftstoffe der land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeuge sowie die stationären Verbrennungen in der Landwirtschaft<sup>135</sup> mit rund 5,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq zu den in 2030 verbliebenen Emissionen bei. Diese sinken 2040 auf rund 4,7 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq und 2050 auf null, da dann auch diese Fahrzeuge mit erneuerbaren strombasierten Kraftstoffen versorgt werden.

<sup>133</sup> THG-Emissionen und Maßnahmen im Bereich LULUCF sind nicht Gegenstand sektoraler Zuordnung im KSP und werden daher in diesem Kapitel nicht betrachtet.

<sup>134</sup> Stand Projektionsbericht der Bundesregierung Mai 2019 (vor dem 31. August 2018 verabschiedete Maßnahmen).

<sup>135</sup> Diese betrugen 2017 6,2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq.



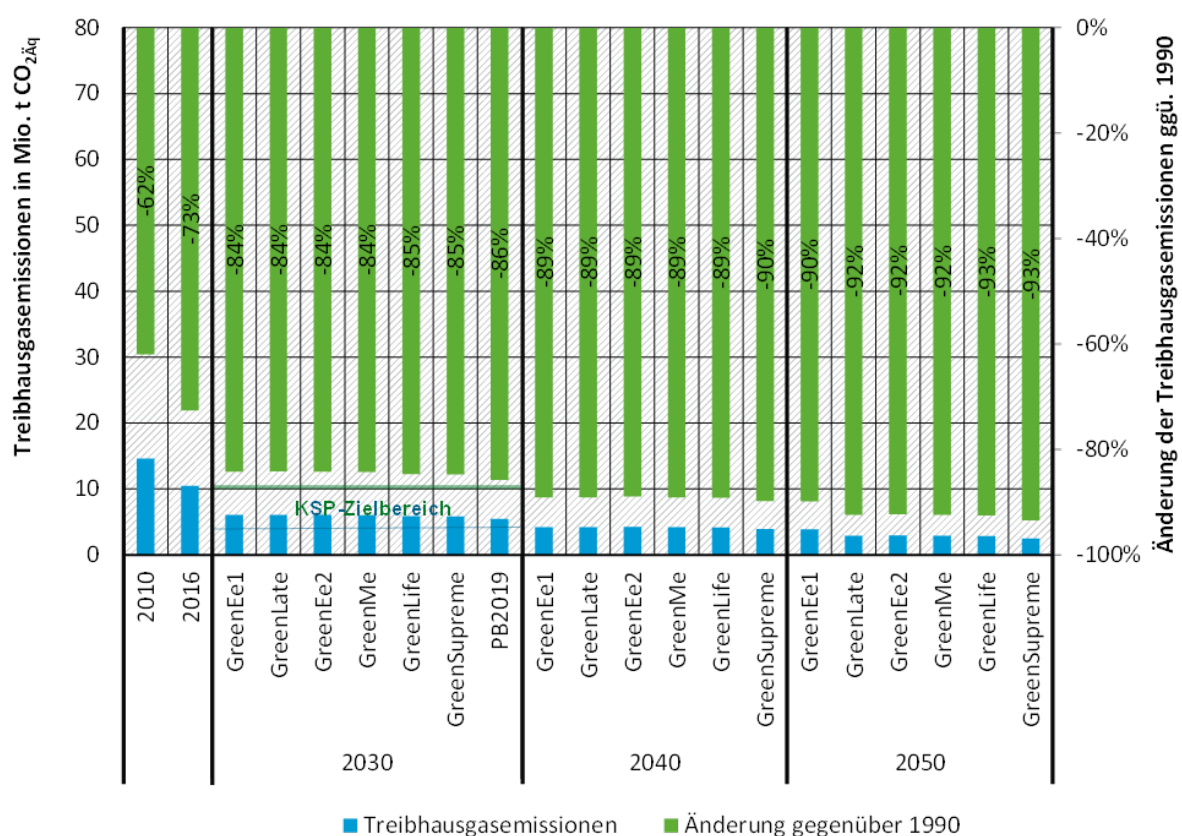
**Abbildung 6-7: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft für die Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

#### 6.1.1.6 Sonstige

Der verursachten Treibhausgasemissionen der Abfallwirtschaft und der Abwasserwirtschaft werden im KSP in der Kategorie Sonstiges zusammengefasst. In diesem Bereich konnten gegenüber 1990 bereits 72,5 % bis 2016 vermieden bzw. auf 10,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq reduziert werden (BMU, 2019b). Das erklärte Ziel der Bundesregierung ist eine Minderung auf 5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq bis 2030, welches mit den aktuellen Politiken<sup>136</sup> verfehlt wird (BMU, 2019b). Auch alle Green-Szenarien verfehlen dieses sektorale Ziel. In GreenLate werden noch rund 6,1 und in GreenSupreme 5,85 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq emittiert, siehe TextBox 5-11. **Alle Green-Szenarien erreichen das sektorale Ziel aber bis Mitte der 2030er.**

<sup>136</sup> Stand Projektionsbericht der Bundesregierung Mai 2019 (vor dem 31. August 2018 verabschiedete Maßnahmen).

**Abbildung 6-8: Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Sonstige für die Green-Szenarien bis 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

## 6.1.2 Entwicklungen der Treibhausgasemissionen in den Green-Szenarien und Einordnung in die nationalen klimapolitischen Ziele

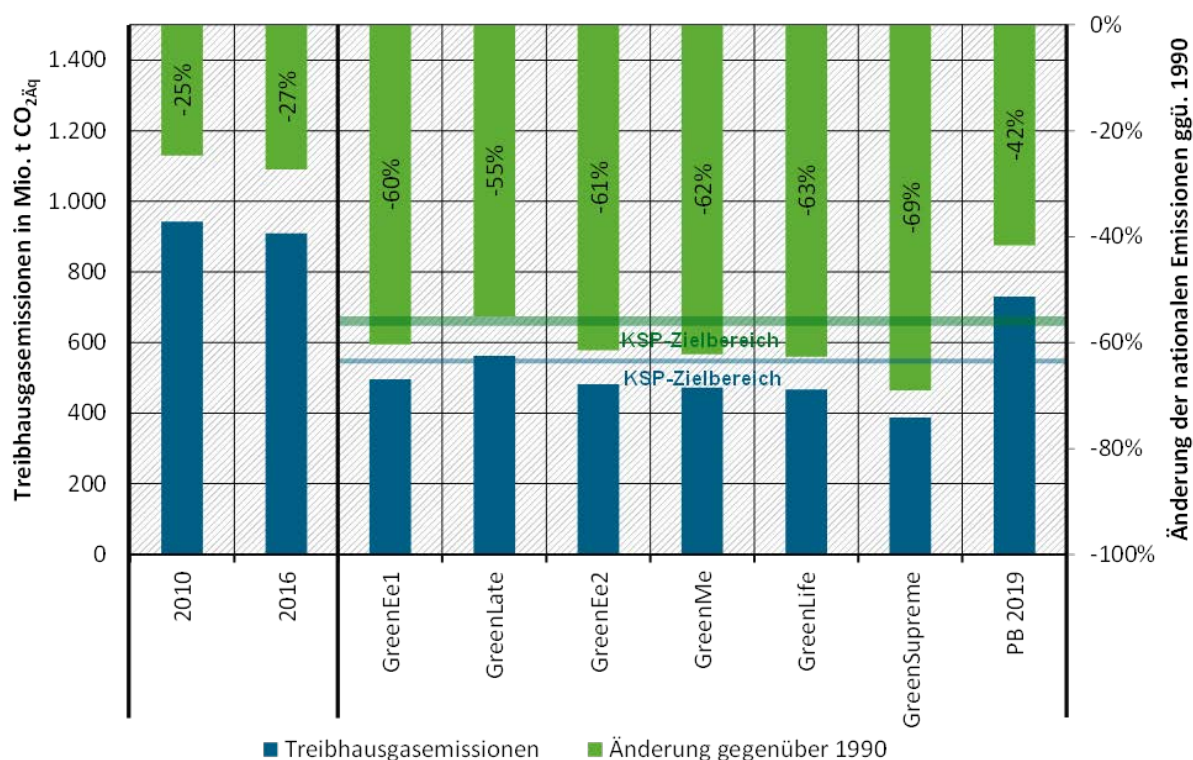
### 6.1.2.1 2030 – auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität

Die Green-Szenarien fokussieren auf weitestgehende Treibhausgasneutralität bis 2050 und spannen einen Lösungsraum über alle Emissionsquellgruppen auf. **Trotz der Verfehlung einzelner sektoraler KSP-Ziele ist das Gesamtminderungsziel bis 2030 in allen Green-Szenarien sicher gewährleistet, insbesondere durch das Voranschreiten der Energiewirtschaft.** Ausschließlich das GreenLate-Szenario bleibt mit einer Minderung um 55 % gegenüber 1990 bis 2030 im Zielbereich des Klimaschutzplans. Die anderen Szenarien gehen deutlich darüber hinaus. GreenEe1 erreicht 60,3 % und GreenEe2, GreenMe sowie GreenLife liegen dabei in einem engen Bereich von 61,4 bis 62,6 % Treibhausgasminderung gegenüber 1990, siehe Abbildung 6-9. GreenSupreme weist mit dem Anspruch einer schnellen Treibhausgasminderung, um die von Menschen verursachten kumulierten Emissionen in der Atmosphäre effektiv zu begrenzen, bereits 2030 eine Reduktion um 69 % auf. Dominiert werden die Minderungen bis 2030 durch den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger in der Stromversorgung und in GreenSupreme zusätzlich durch die bereits frühzeitige Integration erneuerbarer Energien in den Brenn- und Kraftstoffmarkt, wo so auch schnell die Trendwende eingeleitet wird.

**Insgesamt wird deutlich, dass ein gesteigertes Minderungsniveau gegenüber den Zielen der Bundesregierung zwar unter hohen Anstrengungen, aber dennoch erreichbar ist. Es**

sollte daher im Kontext der internationalen Verpflichtungen Deutschlands im Rahmen des Paris-Abkommen auch angestrebt werden.

Abbildung 6-9: Entwicklung der Treibhausgasemissionen bis 2030



Hinweis: Es sind nur Treibhausgasemissionen berücksichtigt, die auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden.  
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

#### 6.1.2.2 2050 – Erreichen der Treibhausgasneutralität

In Abbildung 6-10 ist der Verlauf der Treibhausgasminderung gegenüber 1990 (grün) und die verbliebenen Treibhausgasemissionen (blau) im Vergleich zu den Zielen der Bundesregierung (grüne Bereiche) dargestellt.

**Es ist erkenntlich, dass die Green-Szenarien verschiedene Wege für eine Minderung um mind. 95 % gegenüber 1990 aufzeigen. Allen gemein ist der vollständige Verzicht auf die Nutzung fossiler Energieträger, Verzicht auf die energetische Nutzung von Anbaubiomasse, Verzicht auf den Einsatz von CCS und eine Transformation der Prozesstechniken.**

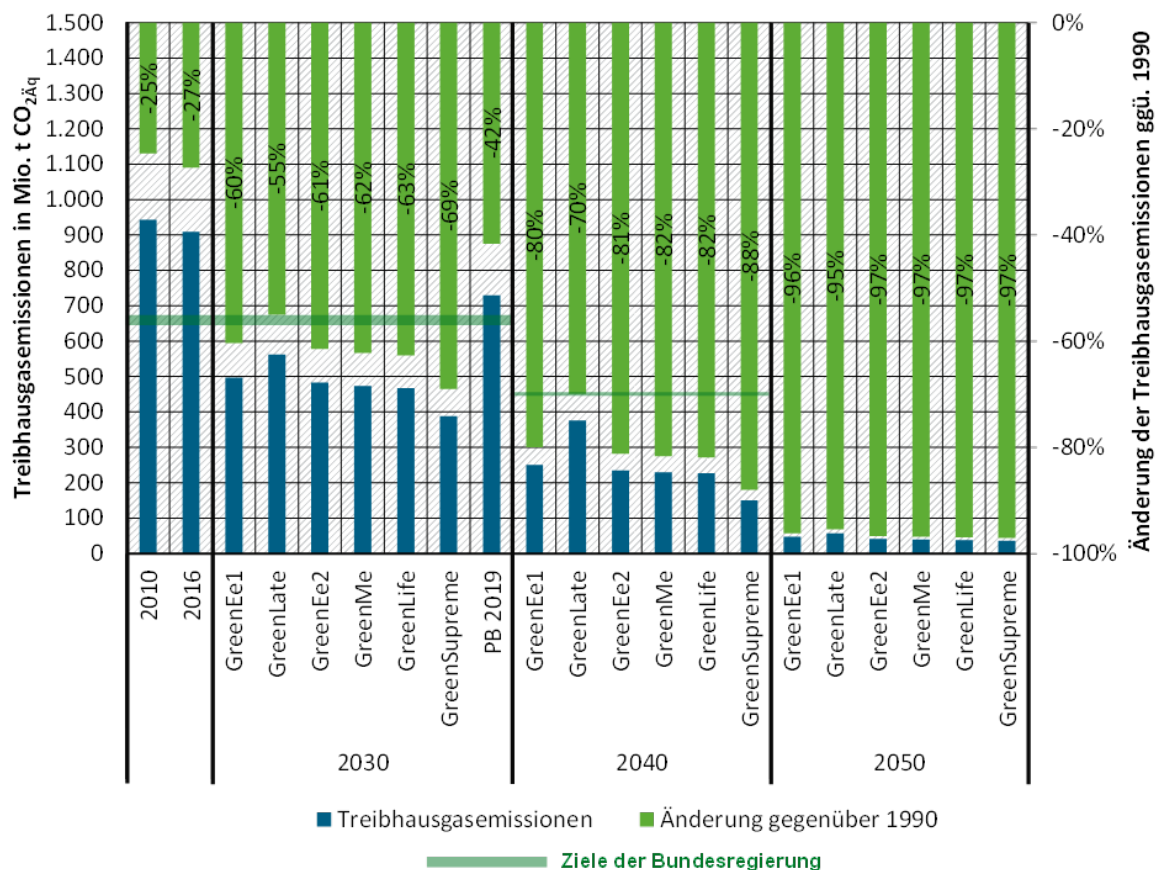
Sämtliche energiebedingten Treibhausgasemissionen können vollständig mit erneuerbaren Energien vermieden werden. Dementsprechend verursachen die Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr und Gebäude 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr. Verbliebener Hauptemittent ist der Bereich Landwirtschaft, welcher zwischen knapp 24 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq (GreenLife und GreenSupreme) und 32,6 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq (GreenLate) der Restemissionen verursacht. Der prozentuale Anteil der verbliebenen Treibhausgasemissionen liegt zwischen 60 und 67 % gegenüber 1990 in der Landwirtschaft. Hauptquellbereiche sind dabei die Tierhaltung und Böden. Der zweitgrößte Treibhausgasverursacher ist die Industrie. Hier entstehen Restemissionen zwischen 10 und 21,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq. Hauptverursacher sind hier die Zement-, Kalk und Glasindustrie. In GreenLate wurden keine alternativen Bindemittel langfristig unterstellt und es wurde von einer wachsenden Branche ausgegangen, während in GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme insbesondere durch die Wechselwirkungen der

Nachfragebereiche die Bauindustrie abnimmt. Dies führt im Ergebnis dazu, dass in GreenLate die Restemissionen etwa doppelt so hoch sind wie in GreenSupreme. Auch im Bereich Abfall- und Abwasserwirtschaft bzw. Sonstige verbleiben Treibhausgasemissionen, die nach heutigem Kenntnisstand nicht vermeidbar sind. Diese betragen zwischen 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq und knapp 3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq (GreenLate). Die konkreten Daten sind Tabelle 6-1 zu finden.

**Tabelle 6-1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen, die auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden**

in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq (gerundete Werte)		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
1990	Energie (ohne Verkehr)	871,28					
	Verkehr	164,48					
	Industrie	96,41					
	Landwirtschaft	79,77					
	Abfall und Abwasser	37,97					
	<b>Summe</b>	<b>1249,83</b>					
2030	Energie (ohne Verkehr)	307,95	342,89	296,6	291,39	292,92	217,25
	Verkehr	100,33	126,66	99,73	97,33	94,96	80,55
	Industrie	30,75	31,75	27,52	25,83	26,96	24,33
	Landwirtschaft	51,54	55,49	52,39	52,39	46,65	40,67
	Abfall und Abwasser	6,05	6,08	6,05	6,03	5,87	5,85
	<b>Summe</b>	<b>496,62</b>	<b>562,87</b>	<b>482,29</b>	<b>472,97</b>	<b>467,35</b>	<b>368,66</b>
2040	Energie (ohne Verkehr)	129,21	213,61	119,68	118,51	121,74	75,2
	Verkehr	52,78	86,2	52,11	49,38	45,96	23,78
	Industrie	24,98	28,97	20,84	19,2	20,6	16,24
	Landwirtschaft	39,08	42,84	38,2	38,2	34,14	23,9
	Abfall und Abwasser	4,19	4,24	4,19	4,17	3,92	3,9
	<b>Summe</b>	<b>250,26</b>	<b>375,86</b>	<b>235,02</b>	<b>229,42</b>	<b>226,37</b>	<b>143,04</b>
2050	Energie (ohne Verkehr)	0	0	0	0	0	0
	Verkehr	0	0	0	0	0	0
	Industrie	16,2	21,44	11,73	10,43	11,58	10,02
	Landwirtschaft	28,39	32,6	26,47	26,47	23,9	23,9
	Abfall und Abwasser	2,9	2,96	2,9	2,88	2,51	2,49
	<b>Summe</b>	<b>47,49</b>	<b>57</b>	<b>41,11</b>	<b>39,77</b>	<b>38</b>	<b>36,42</b>



**Abbildung 6-10: Minderungen der Green-Szenarien bis 2050**

Hinweis: Es sind nur Treibhausgasemissionen berücksichtigt, die auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden.  
 Quelle: eigen Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (BMU, 2019b)

In Abbildung 6-10 ist zu sehen, dass GreenLate mit dem ambitionierten Pfad der Bundesregierung (grüne Bereiche) übereinstimmt. Im Zielpunkt erreicht GreenLate eine Minderung um 95,4 %.

Alle anderen Green-Szenarien erreichen bereits 2030 eine höhere Treibhausgasreduktion als die Zielvorgaben der Bundesregierung derzeit darstellen, die im Wesentlichen auf dem ambitionierten Voranschreiten der Energiewirtschaft basiert. Bis 2040 wird der Unterschied der Szenarien zu GreenLate und den Zielen der Bundesregierung weiter ausgebaut. So erreichen GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife bereits 2040 eine Minderung von 80 bis 82 %. Vor dem Hintergrund der erheblichen Anstrengungen und Investitionen, die in GreenLate in der letzten Dekade bis 2050 unternommen werden, fällt der Unterschied 2050 deutlich geringer aus. Hier erreicht GreenEe1 96,2 % und GreenEe2, GreenMe und GreenLife zwischen 96,7 und 96,9 % Minderung gegenüber 1990.

GreenSupreme ist entsprechend der Szenariencharakteristik wesentlich ambitionierter im Pfad, um einen deutlichen Beitrag zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5 °C zu leisten. So zeigt GreenSupreme bereits 2030 eine Minderung gegenüber 1990 um 69 % und bis 2040 um 88 % auf. Im Jahr 2050 vereinigt GreenSupreme die Effekte der Materialeffizienz aus GreenMe und den stärkeren gesellschaftlichen Wandel aus GreenLife, so dass GreenSupreme mit 97,1 % die höchste Minderung gegenüber 1990 erreicht.

### 6.1.2.3 Berücksichtigung von weiteren nationalen Treibhausgasemissionen

Die gerade dargestellten Treibhausgasemissionen umfassen alle Treibhausgasemissionen, die auch auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden. Sie stellen jedoch nur einen Teil der national verursachten Emissionen dar. Über diese angerechneten Treibhausgasemissionen hinaus werden auch im Bereich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen, Waldbewirtschaftung Treibhausgasemissionen verursacht. Weiterhin sind die Treibhausgasemissionen der national verursachten internationalen Verkehre, also durch den Transport von nationalen Konsumgütern, zu berücksichtigen.

Wie im Kapitel 5.7 erkennbar, zeigt der Bereich LULUC einen Treibhausgasminderungsweg bis 2050 um etwa 86 % gegenüber 1990 auf. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre werden bis 2050 vollständig vermieden, siehe Kapitel 6.1.1.2. Vor diesem Hintergrund verändern sich die Treibhausgasemissionen und die prozentuale Minderung im Vergleich zu den Bilanzrahmen und Zielen der Bundesregierung nur geringfügig.

Deutlich relevanter sind die natürlichen Senken in Verbindung mit einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung, Holznutzung und Flächennutzung. Wie in Kapitel 5.7 bereits beschrieben werden im Rahmen dieser Studie keine Ökosystemberechnungen durchgeführt, sondern Daten aus der Literatur genutzt. Konkret wird für den Wald das Naturschutzpräferenzszenario der WEHAM-Szenarien (Oehmichen et al., 2018) hinterlegt, da es der in den Green-Szenarien aufgezeigten Entwicklung am nächsten kommt. Die stoffliche und energetische Holznutzung erfolgt jedoch in den Green-Szenarien im geringeren Ausmaß, so dass die Übernahme des WEHAM-Szenarios als konservativ betrachtet werden kann, siehe Kapitel 5.7. Unter Berücksichtigung der Treibhausgaswirkung der Holznutzung kann insgesamt mit einem konservativen Senkenpotential von 2030 29,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, 2040 28 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq und 2050 32,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq ausgegangen werden. Eine weitaus optimistischere Annahme wären die Ergebnisse der Greenpeace-Studie „Waldvision“ (Greenpeace, 2018) worin bis 2050 die Kohlenstoffsенке des Waldes auf 90 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq vergrößert wird. Auch konnte in den Green-Szenarien keine Quantifizierung der potentiellen Kohlenstoffsенке der freiwerdenden landwirtschaftlichen Flächen (siehe TextBox 5-16) erfolgen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Kohlenstoffsенке des WEHAM-Naturschutzpräferenzszenarios (Oehmichen et al., 2018) in allen Green-Szenarien sicher gegeben ist. Jedoch wird eine Kohlenstoffsенке in der Größe der Waldvision (Greenpeace, 2018) in den Green-Szenarien nicht erreicht.

Für GreenSupreme sind für das Jahr 2050 diese Emissionen über die angerechneten Emissionen hinaus in der Abbildung 6-11 zu sehen. In Bezug auf die anrechenbaren Emissionen wird 2050 in GreenSupreme eine Minderung um 97,1 % erreicht. Werden die nicht vermeidbaren Emissionen aus LULUC und konservativ die Senken unterstellt, können in GreenSupreme 2050 die Treibhausgasemissionen nahezu vollständig vermieden werden. Bei einer optimistischen Annahme kann auch eine Reduktion von über 103 % gegenüber 1990 erreicht werden. Die Ergebnisse aller Green-Szenarien sind in Tabelle 6-2 für den Zielpunkt dargestellt.

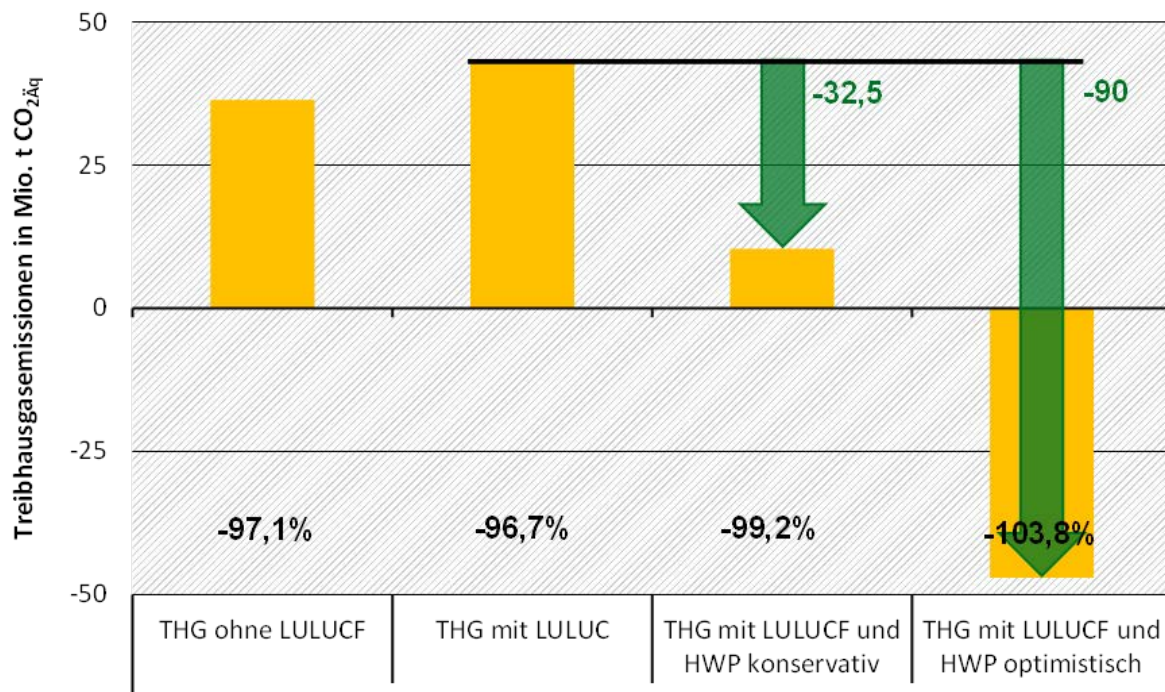
**Damit wird deutlich, dass durch die nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung die ambitionierten Szenarien GreenLife und GreenSupreme Netto-Null-Emissionen erreichen können und selbst GreenLate diesem Anspruch nahe kommt.**

**Für die Erreichung nationaler Treibhausgasneutralität ist kein CCS<sup>137</sup> erforderlich, sondern vielmehr das Stärken natürlicher Senken und damit Heben von Synergien zu**

<sup>137</sup> Carbon, Capture an Storage (CCS) ist in seinen Potentialen begrenzt und mit gewissen Umweltrisiken verbunden (siehe TextBox 6-3), und somit weder eine nachhaltige noch eine dauerhafte Option.

anderen Umweltherausforderungen, wie der Biodiversität, sowie die Erforschung und Umsetzung treibhausgasextensiver Energie- und Industrietechniken.

**Abbildung 6-11: Treibhausgasminderung im Zielpunkt für GreenSupreme mit Berücksichtigung von LULUCF**



Hinweis: Es werden auch die energiebedingten Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre in der Bezugsbasis berücksichtigt.

Quelle: eigene Darstellung und eigene Berechnung auf Basis von (Dittrich et al., 2020e) und (Greenpeace, 2018)

**Tabelle 6-2: Treibhausgasminderung im Zielpunkt (2050) der Green-Szenarien mit Berücksichtigung von LULUCF und internationalen Verkehren**

Green-Szenario	Minderung ggü. 1990 nach Berücksichtigung der angerechneten Treibhausgasemissionen	Minderung ggü. 1990 mit Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus LULUCF konservativ	Minderung ggü. 1990 mit Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus LULUCF optimistisch
GreenEe1	96,2 %	98,3 %	102,9 %
GreenLate	95,4 %	97,5 %	102,1 %
GreenEe2	96,7 %	98,8 %	103,4 %
GreenMe	96,8 %	98,9 %	103,5 %
GreenLife	97 %	99 %	103,6 %
GreenSupreme	97,1 %	99,2 %	103,8 %

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e), (Oehmichen et al., 2018) und (Greenpeace, 2018)

### TextBox 6-3: Carbon Capture and Storage - CCS

Unter CCS wird die Speicherung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) verstanden, um den Ausstoß dieses Treibhausgases in die Atmosphäre zu verringern. Dabei wird aus einem Abgasstrom aus Energieversorgungs- oder Industrieanlagen unter hohen Energieaufwendungen CO<sub>2</sub> abgetrennt

und unter Druck in unterirdische Speicher verpresst. Die Speicherung ist in ausgebeuteten Gas- oder Erdöllagerstätten, in salinen Aquiferen oder im Meeresuntergrund vorgesehen. Die Speicherung in der Wassersäule der Meere ist durch internationale Verträge ausgeschlossen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand, ist davon auszugehen, dass nur 65 bis 80 % des CO<sub>2</sub> dauerhaft gespeichert werden könnten. Durch Leckagen ist mit Risiken für Grundwasser und Boden zu rechnen. Das freigesetzte CO<sub>2</sub> kann Schadstoffe im Untergrund freisetzen sowie salzige Grundwässer aus tiefen Aquiferen verdrängen. Unter ungünstigen Bedingungen können diese verdrängten salzigen Grundwässer bis in oberflächennahe süße Grundwässer und an die Erdoberfläche gelangen. Dort können sie zu Schäden (Versalzungen) im Grundwasser, in Böden und Oberflächengewässern führen. Für die menschliche Gesundheit sind in aller Regel keine unmittelbaren negativen Auswirkungen zu erwarten.

Die Nutzung weiter Teile des tiefen Untergrundes für CCS kann andere Nutzungen einschränken, insbesondere können sich Nutzungskonflikte zur Geothermie ergeben.

### 6.1.3 Einordnung in die globalen klimapolitischen Herausforderungen

Mit der Ratifizierung des Übereinkommens von Paris (ÜvP) haben sich nach aktuellem Stand (vgl. (UNFCCC, 2019)) 185 von 196 Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention verpflichtet, gemeinsam die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg bereits bei 1,5 °C zu stoppen (UNFCCC, 2015). Der jüngste Sonderbericht des IPCC zeigt eindringlich, dass die Risiken für Mensch und Natur bei 2 °C globaler Erwärmung deutlich höher sind als bisher angenommen.

Im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeitsziele sind die notwendigen Klimaschutzmaßnahmen sozial-, wirtschafts- und umweltverträglich schnell zu initiieren. Von den 411 Szenarien die im IPCC SR1.5 (IPCC, 2018a) bewertet wurden, zeigen 53 einen THG-Emissionspfad, der eine globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt<sup>138</sup>. Diese Szenarien und die daraus entstehenden Emissionsentwicklungen haben einige gemeinsame Eigenschaften. Zwei der wichtigsten Eigenschaften sind die Entwicklungen der THG-Emissionen bis 2030 sowie bis 2050. In allen 1,5 °C -Szenarien halbieren sich die CO<sub>2</sub> Emissionen bis 2030 im Vergleich zu 2010.<sup>139</sup> Die globale THG-Minderungsszenarien erreichen eine CO<sub>2</sub>-Neutralität bis ca. 2050.<sup>140</sup> Die nicht-CO<sub>2</sub> Gase werden in globalen Szenarien stark reduziert aber nie vollständig vermieden. Dafür werden Sie von Maßnahmen der CO<sub>2</sub>-Entnahme soweit ausgeglichen, dass die netto Treibhausgasemissionen nach 2050 sogar unter Null liegen. Der genaue Ablauf der Emissionskurve zw. heute, 2030 und 2050 variiert innerhalb der globalen IPCC-Szenarien. Je schneller die THG-Minderung, desto weniger sind sogenannte „negative Emissionen“<sup>141</sup> nach 2050 notwendig. Das hat Implikationen für die Realisierbarkeit sowie Nachhaltigkeit der THG-Minderung.

Auf Basis der unterschiedlichen globalen Pfade wird nachfolgend ein Durchschnittspfad (IPCC-globaler 1,5 °C-Kurs) (IIASA, 2019b) dargestellt und die Entwicklung der Green-Szenarien dazu

<sup>138</sup> Die Szenarien im IPCC SR1.5, die als 1,5 °C Szenarien gelten, sind diejenigen die entweder die Temperatur die ganze Zeit auf maximal 1,5 °C begrenzen oder die kurzzeitig bis zum 0,1 °C das Ziel überschießen und innerhalb einer Dekade auf maximal 1,5 °C stabilisieren.

<sup>139</sup> Bandbreite bzw. Quartilsabstand: -40 bis -60 %.

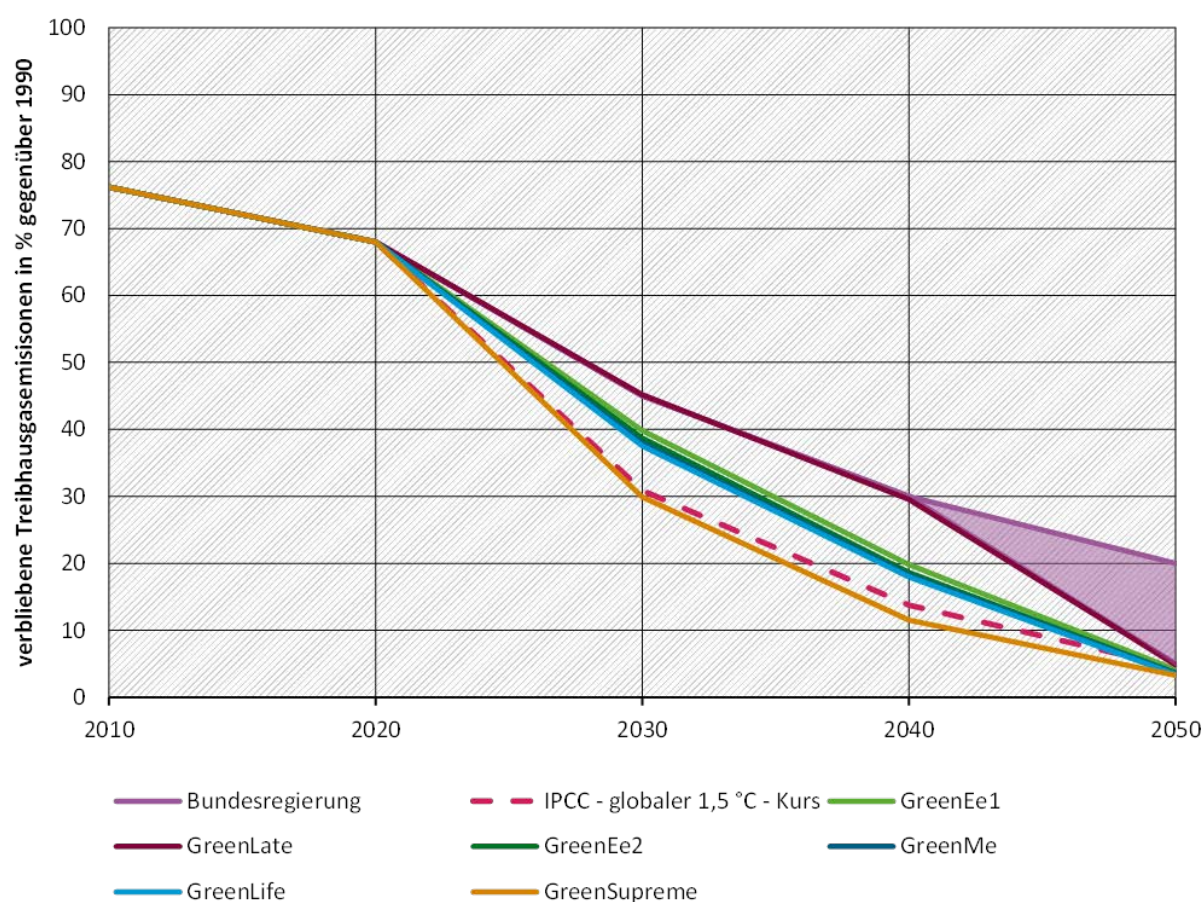
<sup>140</sup> Bandbreite bzw. Quartilsabstand: 2045-2055.

<sup>141</sup> Siehe dazu (UBA, 2019p).



beurteilt, siehe Abbildung 6-12. Der IPCC-globaler 1,5 °C-Kurs stellt einen durchschnittlichen Transformationspfad dar, auf den sich in Summe die Weltgemeinschaft und alle von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen ungefähr bewegen müssen.<sup>142</sup> Er bedeutet nicht, dass jede einzelne Nation exakt diesen Pfad einhalten muss. Vor dem Hintergrund, dass der Wohlstand und die Wirtschaftsleistung Deutschlands auf treibhausgasintensiven Techniken und der Nutzung fossiler Energieträger beruht, sollte Deutschland einen entsprechend ambitionierten Beitrag zur Begrenzung der menschenverursachten Treibhausgasemissionen leisten. Abbildung 6-12 stellt die Entwicklung der verbleibenden Treibhausgasemissionen entlang dieses globalen 1,5 °C-Kurs nach IPCC im Vergleich mit den Green-Szenarien und dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung dar (IPCC, 2018b). **Hier zeigt sich, dass die hohen Ambitionsannahmen in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife nicht den Anforderungen dieses durchschnittlichen globalen 1,5 °C-Kurs nach IPCC genügen.** Es wird auch deutlich, dass die aktuellen Ziele der Bundesregierung nicht ausreichend sind, den globalen Kurs zu folgen. **Green-Supreme hingegen zeigt einen kompatiblen Transformationspfad.**

**Abbildung 6-12: Entwicklung der verbleibenden angerechneten<sup>143</sup> Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien**



Hinweis: Ziele der Bundesregierung basierend auf (BMWi, 2010). Mit (Bundesregierung, 2019) erfolgte keine konkrete Quantifizierung.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (IIASA, 2019b)

<sup>142</sup> Dieser globale Kurs stellt so die durchschnittliche Reduktionsrate der IPCC Szenarien dar, welche mit keinem oder nur geringem kurzzeitigen Überschreiten, sich bei einem Temperaturanstieg auf 1,5 °C stabilisieren.

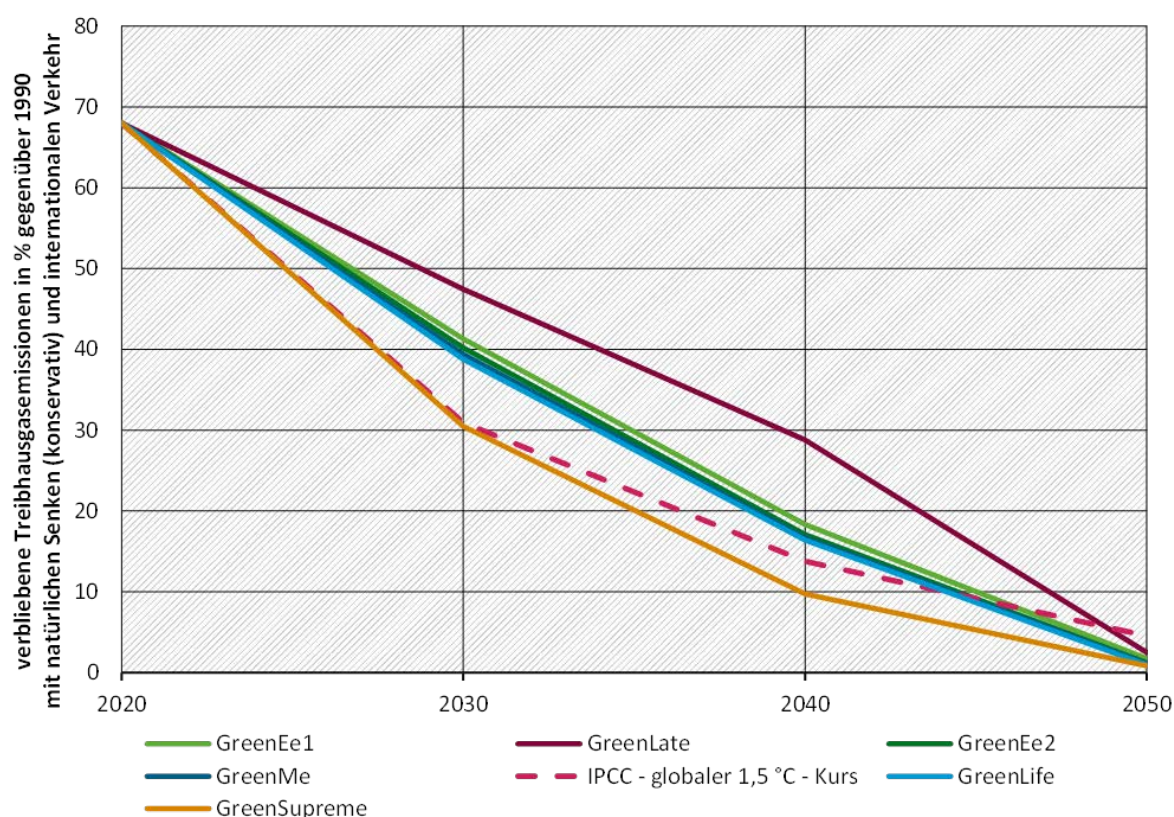
<sup>143</sup> Treibhausgasemissionen, welche in der Zielsystematik der Bundesregierung berücksichtigt werden.

Der globale Kurs unterscheidet nicht in Bilanz- und Systemgrenzen. Vielmehr leitet er sich aus einer globalen Konzentration an Treibhausgasen in der Atmosphäre ab. Daher sind sämtliche Treibhausgasemissionen, also auch die nicht auf die Ziele der Bundesregierung anrechenbaren Treibhausgasemissionen, mit zu berücksichtigen. Diese sind, wie bereits in Kapitel 6.1.2.3 dargestellt, Treibhausgasemissionen aus dem Bereich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen, Waldbewirtschaftung und internationale Verkehre. Berücksichtigt man diese Treibhausgase, so verändert sich die Aussage nicht grundlegend, jedoch sehr wohl für die Dekade nach 2040, wie in Abbildung 6-13 zu sehen ist. Der globale Kurs gelangt erst während der zweiten Jahrhunderthälfte auf Netto-Null und sogar darunter. Dies ist nicht mit dargestellt, da die Green-Szenarien nur bis 2050 modelliert wurden. Es ist zu erkennen, dass die natürlichen Senken immer mehr an Bedeutung gewinnen.

GreenLate und damit auch die Ziele der Bundesregierung ist mit den nationalen Bestrebungen im Transformationspfad bis 2040 weit entfernt von einem hinreichenden Beitrag für die globale Begrenzung auf deutlich unter 2 °C. In Kombination mit den intensiven Klimaschutzbestrebungen und den natürlichen Senken erreicht auch GreenLate das Niveau des globalen Pfades und unterschreitet diesen kurzzeitig.

Auch die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife nähern sich bis 2040 dem globalen Pfad an und unterschreiten diesen Mitte der 2040er. GreenSupreme liegt unter Berücksichtigung dieser Emissionsquellen und –senken nach 2030 weiter unterhalb des globalen Pfades.

**Abbildung 6-13: Entwicklung der verbleibenden Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien unter Berücksichtigung von LULUCF (konservativ) und den CO<sub>2</sub>-Emissionen der international verursachten Verkehre**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (IIASA, 2019a)

Dieser globale 1,5 °C Kurs bildet jedoch in keiner Weise Erwägungen zu Fragen der globalen Gerechtigkeit ab. Vielmehr stellt er den Pfad dar, auf dem sich die Welt insgesamt bewegen muss, wenn CO<sub>2</sub>-Entnahme auf natürliche Kohlenstoffsенke der Landnutzung begrenzt werden soll. Mit dem Übereinkommen von Paris besteht ein Einvernehmen darüber, dass wohlhabende(re)n Ländern wie Deutschland bei dieser Transformation eine besondere Bedeutung zufällt (vgl. Artikel 4 (1) ÜvP). Gründe dafür liegen in der wirtschaftlichen Prosperität, in der technologischen Kapazität sowie in der historischen Entwicklung, nach der diese Länder von der Industriellen Revolution bis in die Gegenwart hinein überproportional mehr Treibhausgase emittierten als die weniger entwickelten Länder. Diverse Studien z. B. (Höhne et al., 2019) zeigen auf, dass unter Gerechtigkeitsaspekten Deutschland bereits vor 2035 Treibhausgasneutralität erreichen müsste. In (Climate Analytics, 2018) wird ein 1,5 °C-Pfad für die OECD-Staaten angegeben, wonach bereits 95 % Minderung gegenüber 1990 bis 2030 erreicht werden müssten und für die EU wird bereits 2030 eine Treibhausgasneutralität als erforderlich aufgezeigt.

**Ein Transformationspfad wie GreenSupreme für Deutschland erfordert eine umfassende Umsetzung von nationalen Klimaschutzmaßnahmen. Um einem global angemessenen Beitrag Deutschlands so nah wie möglich zu kommen sind allerdings darüber hinaus ambitionierte internationale Kooperation, Finanzierung und Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen außerhalb Deutschlands notwendig.** Für GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife stellt dies bereits größere Herausforderungen dar. Hingegen scheint für GreenLate und dem Zielpfad der Bundesregierung dieser Anspruch mittlerweile außer Reichweite zu geraten, um noch mit internationaler Kooperation zu Klimaschutzprojekten auf einen globalen, nach Gerechtigkeitsprinzipien kompatiblen Pfad zu gelangen.

Zu beachten ist, dass darüber hinaus weitere klimarelevante Emissionen durch den Menschen verursacht werden, die derzeit aus wissenschaftlicher Perspektive noch nicht genau quantifiziert werden können, wie die insgesamt erwärmend wirkenden Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte im Luftverkehr (siehe TextBox 6-1). **Daraus resultiert eine zusätzliche, noch nicht quantifizierbare Verschärfung der Reduktionsanforderungen. Damit wird umso deutlicher, dass allein aus dem Vorsorgeprinzip ein schnelles Handeln in allen Bereichen erforderlich ist, um annähernd dem globalen Kurs für die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C gerecht zu werden.**

#### 6.1.4 Aufsummierte Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien

In der Abbildung 6-13 wurde der Transformationspfad der Green-Szenarien gezeigt und sichtbar, dass Treibhausgasneutralität in den Green-Szenarien und insbesondere in GreenSupreme bis 2050 erreichbar ist, ohne CCS einzusetzen. Dabei wird offenkundig, dass unterschiedliche Pfade zu diesem Ziel führen und damit im Laufe des Transformationspfades auch unterschiedliche Treibhausgasemissionen in Summe anfallen. Diese sind für die auf die Ziele der Bundesregierung angerechneten Treibhausgasemissionen in Tabelle 6-3 zu sehen.

In GreenSupreme werden bis 2050 noch einmal knapp die Hälfte der seit 1990 bis 2015 emittierten Treibhausgasemissionen emittiert. Die Auswirkungen eines verzögerten Handelns werden besonders im Vergleich zu GreenLate offenkundig. Zwar wird die Treibhausgasneutralität auch in GreenLate 2050 erreicht, aber auf dem Weg dahin werden jedoch rund 4,8 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, also etwa 37 %, mehr als in GreenSupreme ausgestoßen. Es wird auch offenkundig, dass alle anderen Szenarien bereits vor 2040 so viele Treibhausgasemissionen ausstoßen, wie GreenSupreme aufsummiert bis 2050 emittiert. Konkret werden in GreenLate bereits 2034, in GreenEe1 und GreenEe2 2036 und GreenMe und



GreenLife 2037 wie in GreenSupreme bis 2050 summiert seit 1990 in die Atmosphäre ausgestoßen.

**Damit wird deutlich, dass zur Begrenzung der kumulierten Treibhausgasemissionen eine geringe Verschärfung der kurzfristigen Zwischenziele nur im begrenzten Maße Wirkung hat. Es bedarf vielmehr schnelles und deutlich ambitioniertes Handeln.**

**Tabelle 6-3: Kumulierte Treibhausgasemissionen in den Green-Szenarien<sup>144</sup> entsprechend der angerechneten<sup>145</sup> Emissionen auf die Ziele der Bundesregierung**

In Mrd. t CO <sub>2</sub> Äq	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
von 1990 bis 2015	26,97					
dazu bis 2030	10,54	11,04	10,44	10,37	10,32	9,58
dazu bis 2040	3,61	4,6	3,46	3,39	3,35	2,45
dazu bis 2050	1,39	2	1,28	1,25	1,23	0,84
Summe von 1990 bis 2050	42,51	44,61	42,15	41,98	41,87	39,84

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

#### **TextBox 6-4: Abhängigkeit der Erderwärmung von der Konzentration der Treibhausgase in der Erdatmosphäre**

Treibhausgase haben unterschiedliche Verweildauern in der Atmosphäre. CO<sub>2</sub> hat beispielsweise eine sehr lange Verweildauer und sammelt sich dementsprechend an. Zwischen der über einen bestimmten Zeitraum ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-Gesamtmenge (kumulierte CO<sub>2</sub>-Emissionen) und der projizierten Temperaturänderung besteht ein nahezu linearer Zusammenhang. Das bedeutet, dass die Gesamtmenge an CO<sub>2</sub>, die bis zu einer Einschränkung der globalen Erwärmung, z. B. auf 1,5 °C oder 2 °C, noch emittiert werden kann, begrenzt ist.

Die genaue Höhe des noch möglichen von Menschen verursachten Treibhausgasausstoßes zur Begrenzung der Erderwärmung auf ein bestimmtes, maximales Temperaturniveau ist jedoch mit hohen Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten resultieren z. B. in Bezug auf den Einfluss anderer Treibhausgase, auf historische Emissionen, auf den Referenzzeitraum, auf Temperaturdaten u.v.m. Im fünften Sachstandsbericht des IPCC wurde das verbleibende globale CO<sub>2</sub>-Budget im Mittel für das Einhalten der 2 °C-Obergrenze mit einer 66 % Wahrscheinlichkeit von insgesamt etwa 1000 Mrd. t CO<sub>2</sub> ab dem Jahr 2011 abgeschätzt. Für 1,5 °C betrug die Abschätzung 400 Mrd. t CO<sub>2</sub>. Mit dem IPCC-SR1.5 (IPCC, 2018a) wurden die verbleibenden globalen CO<sub>2</sub>-Budgets ab 2018 für 1,5 °C mit einer 66 % Wahrscheinlichkeit im Mittel etwa 420 Mrd. t CO<sub>2</sub>, sowie für 2 °C mit einer 66 % Wahrscheinlichkeit im Mittel etwa 1170 Mrd. t CO<sub>2</sub> abgeschätzt. Für 1,5 °C sind die Unsicherheiten der Abschätzung etwa so groß wie die Schätzung des globalen Budgets selbst. Allein hier werden die Unsicherheiten sichtbar und die Herausforderungen für wissenschaftlich belastbare Aussagen.

Darüber hinaus ist zu bedenken, dass die Wirkung anderer Treibhausgasemissionen bzw. Treibhausgaseffekte nicht gleichfalls linear ist, aber sehr wohl bei der Begrenzung der Erderwärmung zu berücksichtigen sind. So werden bspw. im IPCC-SR1.5 (IPCC, 2018a) keine

<sup>144</sup> Es wurde zwischen den Stützjahren vereinfachend eine lineare Entwicklung unterstellt.

<sup>145</sup> Ohne LULUCF und internationale Verkehre.



Erdsystem-Feedbacks wie CO<sub>2</sub> und Methan aus tauendem Permafrost oder tropischen Feuchtgebieten berücksichtigt.

Neben den methodischen Herausforderungen ergeben sich gleichfalls Herausforderungen zur Übertragung auf einzelne Staaten oder Staatengruppen. So würde bspw. ein reiner pro Kopf-Ansatz die historische Verantwortung und Aspekte der Gerechtigkeit vernachlässigen.

Damit wird deutlich, dass sich die globalen Abschätzungen zur Höhe des noch möglichen von Menschen verursachten Treibhausgasausstoßes wenig eignen sind, um daraus kurz- und mittelfristige Handlungsziele im nationalen Klimaschutz abzuleiten.

Deutlich geeigneter sind Zwischenziele, die sich aus dem langfristigen Umweltqualitätsziel, der globalen Begrenzung des Temperaturanstieges bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ableiten. Zur Erreichung ist im IPCC-SR1.5 (IPCC, 2018a) das Handlungsziel, Treibhausgasneutralität bzw. Netto-Null um die Jahrhundertmitte, formuliert.

### 6.1.5 Green-Szenarien im Kontext der Klimaschutzpolitik in Europa

Mit dem Übereinkommen von Paris (ÜvP) und dem IPCC-SR1.5C (2018) steht auch die Europäische Union (EU) vor der Herausforderung, ihren klimapolitisch angemessenen Beitrag zur Erreichung der globalen Langfristziele neu zu definieren und zugleich bestehende mittel- wie langfristige Zielsetzungen zu überprüfen. Als Staatenbund von achtundzwanzig souveränen Staaten verfügt die EU mit den Energie- und Klimapaketen 2020<sup>146</sup> und 2030<sup>147</sup> weltweit gesehen über einen stringenten Rechtsrahmen, mit dem die Umsetzung der klima- und energiepolitischen Beschlüsse und die Zielkonformität der Entwicklungen umfassend und laufend geprüft werden. Auf dieser Grundlage erfüllen die Mitgliedstaaten (MS) der EU, so auch Deutschland, gemeinschaftlich zugleich ihre Emissionsminderungszusagen für die Jahre 2020 und 2030 gegenüber der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC). Innereuropäisch stärkt zudem die Governance-Verordnung (GovVO) der Energie-Union (EP & Rat der Europäischen Union, 2018b) die Klimaschutzvorgaben für die Zeithorizonte 2030 (Art. 9 GovVO) und 2050 (Art. 15 GovVO), indem von allen MS die Entwicklung von nationalen Energie- und Klimaschutzplänen (NECP – National Energy and Climate Plans) bis Ende 2019 sowie Langfriststrategien bis Anfang 2020 eingefordert werden<sup>148</sup>. Schließlich hat die Europäische Kommission (EU-KOM) im November 2018 mit ihrer Mitteilung „A clean planet for all“ (EK, 2018a) den Auftakt für die Strategieentwicklung hin zu einer prosperierenden, modernen, wettbewerbsfähigen und klimaneutralen Wirtschaftsweise bis zur Jahrhundertmitte gesetzt. In dieser Debatte haben sich die Staats- und Regierungschefs der EU-Mitgliedstaaten im Sommer mehrheitlich für das Handlungsziel „Klimaneutralität in 2050“ ausgesprochen (ER, 2019).

Die analytische Grundlage hierfür bilden die 1,5 °C-Szenarien in der Folgenabschätzung zur KOM-Mitteilung (EK, 2018b)<sup>149</sup>. Diese erreichen wie die Green-Szenarien im Zielpunkt 2050 netto-Null-Emissionen über alle Treibhausgasquellen. Wenngleich die Kommission Mitteilung u. a. wegen der Inkompatibilität der KOM-80%-Szenarien mit dem ÜvP durchaus kritisch aufgegriffen wurde (z. B. (Climate Action Network Europe, 2018); (Wachsmuth et al., 2018)),

<sup>146</sup> Vgl. (EK, 2019a) sowie zugrunde liegende Rechtsakte zum Emissionshandel (Direktive 2003/87/EC) und zu Sektoren außerhalb des Emissionshandels (Effort-Sharing Decision No 406/2009/EC) sowie weitere Regelungen.

<sup>147</sup> Vgl. (EK, 2019a) sowie zugrunde liegende Rechtsakte zum Emissionshandel (Direktive 2003/87/EC) und zu Sektoren außerhalb des Emissionshandels (Lastenteilung-Verordnung (EU) 2018/842) sowie zu LULUCF (Verordnung EU 2018/841).

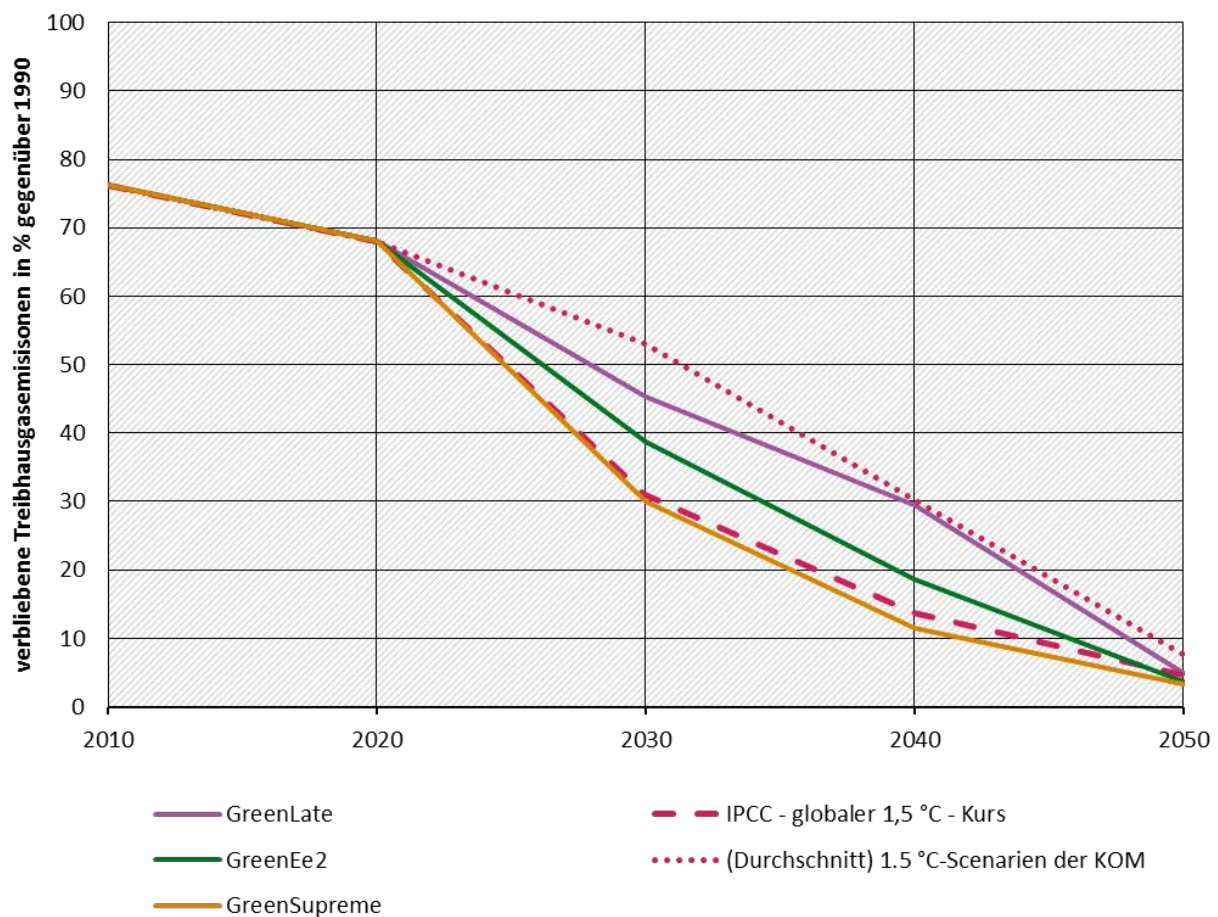
<sup>148</sup> weitere Regelungen der GovVO betreffen u. a. Energieversorgungssicherheit, Binnenmarkt, Verbundfähigkeit der Stromnetze, sowie Monitoring- und Berichtspflichten.

<sup>149</sup> Die übrigen sechs Szenarien der Folgenabschätzung erreichen lediglich Emissionsminderungen zwischen 80 % und 90 % unter dem Niveau von 1990.

stellen neuere wissenschaftliche Analysen (Wachsmuth, Eckstein, et al., 2019) und aktuelle Verlautbarungen aus Industrieverbänden (z. B. (Europäische Bewegung Deutschland e.V., 2019)) auch das große Potenzial des EU-Vorstoßes heraus. Insbesondere mit den beiden 1,5 °C-Szenarien liegt eine stabile Grundlage für die Entwicklung einer Langfrist-Klimaschutzstrategie für die EU zur Übermittlung an die UN-Klimarahmenkonvention vor, mit der zumindest ein deutlich höheres Ambitionsniveau in 2050 als bisher angestrebt wird und für die EU-Wirtschaft verlässliche Rahmenbedingungen in der Langfristperspektive gesetzt werden können.

Im Vergleich zu den Green-Szenarien unterscheiden sich die 1.5 °C-Szenarien der KOM-Folgenabschätzung besonders in den technologischen Annahmen und in der Treibhausgasemissionsentwicklung bis 2050. Mit Blick auf die Energieversorgung fußen beispielsweise selbst die beiden ambitioniertesten KOM-Szenarien nicht auf einer vollständigen Versorgung durch erneuerbare Energieträger, sondern ziehen noch in 2050 signifikante Anteile fossiler und nuklearer Energieträger ein. **Die ambitionierten 1.5 °C-Szenarien der KOM liegen im Ambitionsniveau aber deutlich niedriger als GreenSupreme und dem IPCC-globalen 1,5 °C. Insbesondere im Zeitraum bis 2040 zeigen die 1,5 °C-Szenarien ein geringes Ambitionsniveau, welches auch unter GreenLate liegt,** wie in Abbildung 6-14 zu sehen ist.

**Abbildung 6-14: Entwicklung der verbleibenden angerechneten<sup>150</sup> Treibhausgasemissionen der Green-Szenarien und EU 1.5 °C-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) und (EK, 2018b)

Auf Ebene der Mitgliedstaaten waren die Arbeiten an Klimaschutzszenarien mit einem Zeithorizont bis 2050 bislang eng an die EU Berichterstattungs-Verordnung (MMR<sup>151</sup>) geknüpft (Low-Carbon-Development Strategies). Deren Ursprung liegt in den Cancun-Beschlüssen (Cancun Agreements) unter der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC, 2010), die noch die Zwei-Grad-Obergrenze als globale Ambition festlegten. Wie zeitnahe Analysen kurz nach dem Zustandekommen des Paris Abkommens belegen (Duscha et al., 2017), fokussierten die meisten Szenario-Arbeiten staatlicher und nichtstaatlicher Einrichtungen in beinahe allen EU Mitgliedstaaten jedoch auf die Einhaltung dieser Zwei-Grad-Obergrenze. Neuere Analysen zeigen bis dato, dass die nationalen Strategien zudem weitgehend unabhängig voneinander entwickelt wurden (EEA, 2018). Vor dem Hintergrund des ÜvP und mit der nun geltenden EU-GovVO zeichnet sich nun aber ab, dass Klimalangfriststrategien der einzelnen Mitgliedsstaaten neuerlich überarbeitet (Climate Recon, 2019) und beispielsweise für Deutschland, Frankreich und die skandinavischen Staaten auch Pfade hin zur Treibhausgasneutralität aufgezeigt werden (Emele et al., 2019). Neben der Verschärfung der vormaligen 80 - 95 % Zielkorridore auf Treibhausgasneutralität werden mit diesen Arbeiten auch Pfade hin zur Treibhausgasneutralität

<sup>150</sup> Treibhausgasemissionen, welche in der Zielsystematik der Bundesregierung berücksichtigt werden. Also ohne LULUCF und Treibhausgasemissionen aus internationalen Verkehren.

<sup>151</sup> Monitoring-Mechanism-Regulation: Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen sowie für die Berichterstattung über diese Emissionen und über andere klimaschutzrelevante Informationen auf Ebene der Mitgliedstaaten und der Union und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 280/2004/EG (ABl. L 165 vom 18.6.2013, S. 13) (EP & Rat der Europäischen Union, 2013).

und damit die kumulierten Emissionen mehr und mehr in den Blick genommen. Dies trifft hauptsächlich auf das Szenario GreenSupreme zu, welches neben der Berücksichtigung von übergreifenden Nachhaltigkeitskriterien bereits für den Zeithorizont 2030 von verschärften Klimaschutzanstrengungen in Deutschland, d. h. rund 70 %igen Emissionsminderung gegenüber dem Niveau von 1990, zeigt.

### **6.1.6 Schlussfolgerungen für die nationale Klimapolitik**

Insgesamt zeigen die Green-Szenarien verschiedene Wege in eine treibhausgasneutrale Gesellschaft auf. Gleichwohl wird deutlich, dass in allen Bereichen für eine Transformation in den kommenden 30 Jahren erhebliche technische Entwicklungen und Innovationen erforderlich sind. Auch wird deutlich, dass dies ohne einen gesellschaftlichen Wandel nicht erreichbar ist.

- ▶ Für eine nachhaltige Entwicklung ist ein ambitioniertes Vorgehen im Klimaschutz erforderlich. Dabei sollte mindestens für die national verursachten Treibhausgasemissionen eine Minderung entsprechend eines globalen IPCC-1,5 °C-Kurs angestrebt werden. Dies bedeutet bereits bis 2030 eine Minderung gegenüber 1990 in der Größenordnung von mindestens 70 %, wie sie bspw. in GreenSupreme aufgezeigt wird.
- ▶ Bis spätestens 2050 ist Treibhausgasneutralität zu erreichen, indem die menschenverursachten Treibhausgasemissionen nach dem jeweiligen Kenntnisstand vermieden werden und natürliche Senken gestärkt werden. Das heißt die Emissionen werden ab 2050 gering genug gehalten, dass sie von den natürlichen Senken der Landnutzung ausgeglichen werden können.
- ▶ In allen Sektoren haben Maßnahmen, die den Ausstoß von menschenverursachten Treibhausgasen in die Atmosphäre mindern, Priorität und können auch nicht durch nachhaltige Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre dauerhaft ersetzt werden. Daher müssen in allen Bereichen schnell und deutlich ambitionierte Maßnahmen ergriffen werden.
- ▶ Der Verzicht auf die Nutzung fossiler Rohstoffe und Energieträger in allen Sektoren ist unabdingbar. Die energiebedingten Emissionen bei der Nutzung fossiler Energieträger verursachen national, europäisch und global die meisten Treibhausgasemissionen. Für eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Entwicklung ist der Verzicht auf die Nutzung fossiler Energieträger unausweichlich und muss schnellstmöglich umgesetzt werden.
- ▶ Eine nachhaltige Nutzung der begrenzten Ressource Fläche (bodenschonende und humusmehrende Landbewirtschaftung, Moorschutz und -renaturierung, Grünlanderhalt und Wiederaufforstung) bietet die Möglichkeit, der Atmosphäre auf natürlichem Wege CO<sub>2</sub> zu entnehmen und gleichzeitig zur Anpassung an den Klimawandel sowie zu einigen globalen Nachhaltigkeitszielen beizutragen. Diese Möglichkeiten bestehen bereits heute und sollten daher mit entsprechenden Rahmenbedingungen gefördert werden.
- ▶ Das Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Entnahme und anschließenden Speicherung ist begrenzt und mit gewissen Umweltrisiken verbunden, und somit weder eine nachhaltige noch eine dauerhafte Option. Für die Erreichung nationaler Treibhausgasneutralität ist dies auch nicht



erforderlich, sondern vielmehr das Stärken natürlicher Senken und damit Heben von Synergien zu anderen Umweltherausforderungen, wie der Biodiversität, sowie die Forschung und Umsetzung treibhausgasextensiver Energie- und Industrietechniken.

- ▶ Klimaschutz im alltäglichen Denken und Handeln ist die Basis einer nachhaltigen Entwicklung. Eine Änderung unseres täglichen Konsumverhaltens ist notwendig, um den Druck auf die natürlichen Ressourcen zu entlasten. Die gesündere Ernährung der Bevölkerung in Kombination mit der Reduktion der Tierbestandzahlen ist hierfür nur ein Beispiel. Gerade diese Transformation ermöglicht für die Bevölkerung einen positiven Nutzen und ermöglicht einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und damit für die folgenden Generationen.
- ▶ Die Verzahnung von europäischer und nationaler Klimaschutzpolitik ist unumgänglich und muss prioritär mit Blick auf Treibhausgasneutralität bis spätestens 2050 und stärkeren Emissionsminderungen bis dahin (Minimierung von kumulierten Emissionen) weiter gestärkt werden. Deutschland könnte hinsichtlich Treibhausgasneutralität und Minimierung von kumulierten Emissionen die Funktion eines Vermittlers zwischen EU-Institutionen und noch zurückhaltenden EU Mitgliedstaaten einnehmen, indem es Austausch in verschiedensten Formaten unter Einbeziehung eigener Erfahrungen (z. B. Elemente zur sozialverträglichen und gerechten Transformation im Kompromiss zum Kohleausstieg, Beteiligungsprozess Klimaschutzplan 2050) noch stärker befördert.
- ▶ Nachdem Deutschland sich zur Treibhausgasneutralität spätestens in 2050 bekannt und gleichzeitig verstärkte Emissionsminderungen für den Zeitraum bis 2030 zugesagt hat, sollte es zusätzlich international darauf hinwirken, dass auch andere Staaten bis spätestens 2050 treibhausgasneutral werden. Darüber hinaus sind weitere Maßnahmen von Deutschland zu ergreifen, um Diskussionen der globalen Gerechtigkeit und der historischen Verantwortung im Klimaschutz mitgestalten zu können. Es sind zusätzliche globale Treibhausgasreduzierungen durch finanzielle, technologische Hilfen und Wissenstransfer zu unterstützen. Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Schutz und Ausbau der natürlichen Senken sollte dabei im Fokus stehen

## 6.2 Rohstoffinanspruchnahme

Für die Green-Szenarien wird mit Hilfe der gesamtwirtschaftlichen Materialflussrechnung (economy-wide material flow accounts = EW-MFA) eine Übersicht über die aggregierten Stoffströme in die deutsche Volkswirtschaft (inländische Primärrohstoffentnahme, Importe und Input von inländischen Sekundärmaterialien) sowie Exporte ins Ausland ermittelt. Die unterschiedlichen Annahmen der Green-Szenarien zur Rohstoffinanspruchnahme werden schwerpunktmäßig im RMC (Raw Material Consumption)<sup>152</sup>, also der Primärrohstoffnutzung für den inländischen Konsum und die Investitionen, im Folgenden als „Primärrohstoffkonsum“ bezeichnet, aufgezeigt.

---

<sup>152</sup> RMC (Raw Material Consumption) setzt sich zusammen aus der inländischen Rohstoffentnahme und den Importen abzüglich der Rohstoffe die für die Herstellung exportierter Güter verwendet werden. Um die indirekten Importe („Rohstoff-Äquivalente“) zu berechnen, werden die Input-Output-Tabellen des URMOD-Modells inkl. Daten zu Im- und Exporten der deutschen Volkswirtschaft herangezogen.

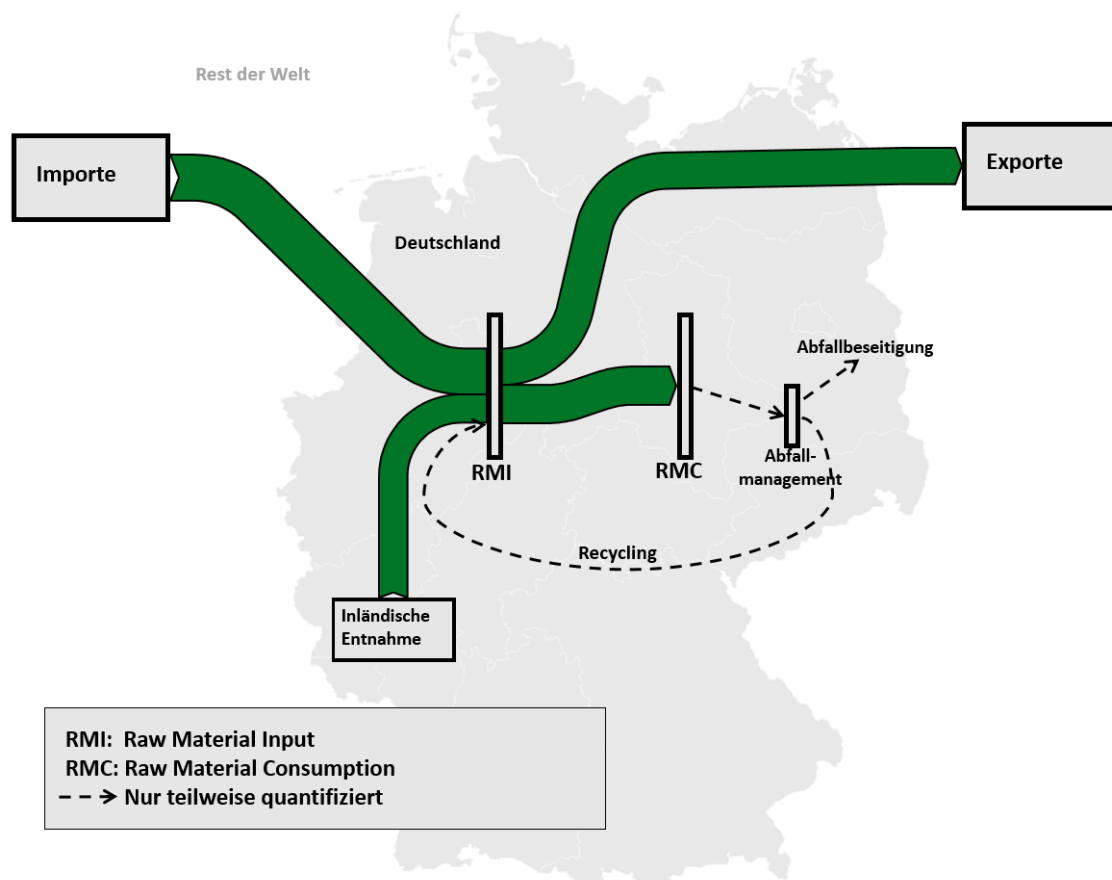
Weiterhin wird auf den Raw Material Input (RMI)<sup>153</sup>, den gesamten Primärrohstoffeinsatz der Volkswirtschaft eingegangen, welcher auch jene Rohstoffe umfasst, welche letztlich für die Exportgüter aufgewendet werden müssen. Die Indikatoren RMC und RMI werden unterteilt in die Rohstoffkategorien Biomasse, fossile Energieträger, Mineralien und Metalle (Abbildung 6-15). Die Rohstoffinanspruchnahme der international gehandelten Güter wird in sogenannten „Rohstoffäquivalenten“ berechnet, um Rohstoffextraktionen im In- und Ausland vergleichbar darzustellen. Rohstoffäquivalente sind die Menge der Primärrohstoffe, die für ein im- bzw. exportiertes Produkt gebraucht wird. Mit der Förderung und dem Einsatz von Rohstoffen fallen auch Abraum, Bergematerial oder Bodenaushub an. Diese Materialien werden als „ungenutzte Entnahmen“ bezeichnet, da sie nicht direkt Eingang in Produktionsprozesse finden und sind in den Indikatoren Total Material Requirement/Consumption (TMR/TMC) berücksichtigt. Aktuelle Zahlen zur ungenutzten Entnahme, insbesondere der Importe, können aufgrund von fehlenden Statistiken jedoch nicht berichtet werden.

Zusätzlich werden ausgewählte rohstoffspezifische Ergebnisse präsentiert, also für Rohstoffe, welche für die Transformation bis 2050 von besonderer Bedeutung sind. Abfallströme wurden in diesem Vorhaben nicht explizit ausgewiesen. Weitere Details zu Rohstoffrechnungen, Modellierungsansatz in URMOD und einzelnen Annahmen finden sich in den Forschungsberichten von Ifeu/SSG/Fraunhofer (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e).

Mit den Charakteristiken der Green-Szenarien, siehe Kapitel 3.1, wird bereits ein breiter Lösungsraum für die Entwicklung zur Rohstoffinanspruchnahme aufgezeigt. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass nicht alle potenziell möglichen Variationen bei der Rohstoffinanspruchnahme mit Ergebnisrelevanz abgebildet werden konnten. Hierzu zählen insbesondere die Annahme zum Erzgehalt und die regionale Verteilung der Importe. Beides wurde in allen Szenarien als konstant gegenüber 2010 angenommen. Auch die Relation von Import und heimischer Entnahme wurde mit Ausnahme der Steinkohle in keinem Szenario verändert.

---

<sup>153</sup> RMI (Raw Material Input) setzt sich zusammen aus der inländischen Rohstoffentnahme und den Importen. Um die indirekten Importe („Rohstoff-Äquivalente“) zu berechnen, werden die Input-Output-Tabellen des URMOD-Modells inkl. Daten zu Im- und Exporten der deutschen Volkswirtschaft herangezogen.

**Abbildung 6-15: Übersicht von Rohstoffindikatoren und damit verbundenen Stoffströmen**

Quelle: eigene Darstellung

### 6.2.1 Rohstoffinanspruchnahme in den Green-Szenarien

Die Transformation hin zu einem weitestgehend treibhausgasneutralen Deutschland hat erhebliche Auswirkungen auf die Rohstoffinanspruchnahme. Je nach Szenario unterscheiden sich die Auswirkungen auf die Rohstoffkategorien (Biomasse, Metallerze, Nicht-metallische Mineralien, Fossile Energieträger).

Wichtige Faktoren zur Reduktion des Primärrohstoffkonsums umfassen u. a. die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbaren Energiequellen und der damit verbundene Wegfall der Nachfrage nach fossilen Energieträgern. Weitere wichtige Faktoren sind Strukturpolitiken wie die Reduktion der Ausweisung von Siedlungsflächen, Energieeinsparungen, der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen, die Optimierung von Verarbeitungsprozessen durch Substitutionen und Materialeffizienzsteigerungen und Lebensstiländerungen (siehe Kapitel 3.1 für einen Überblick der Annahmen in den einzelnen Szenarien).

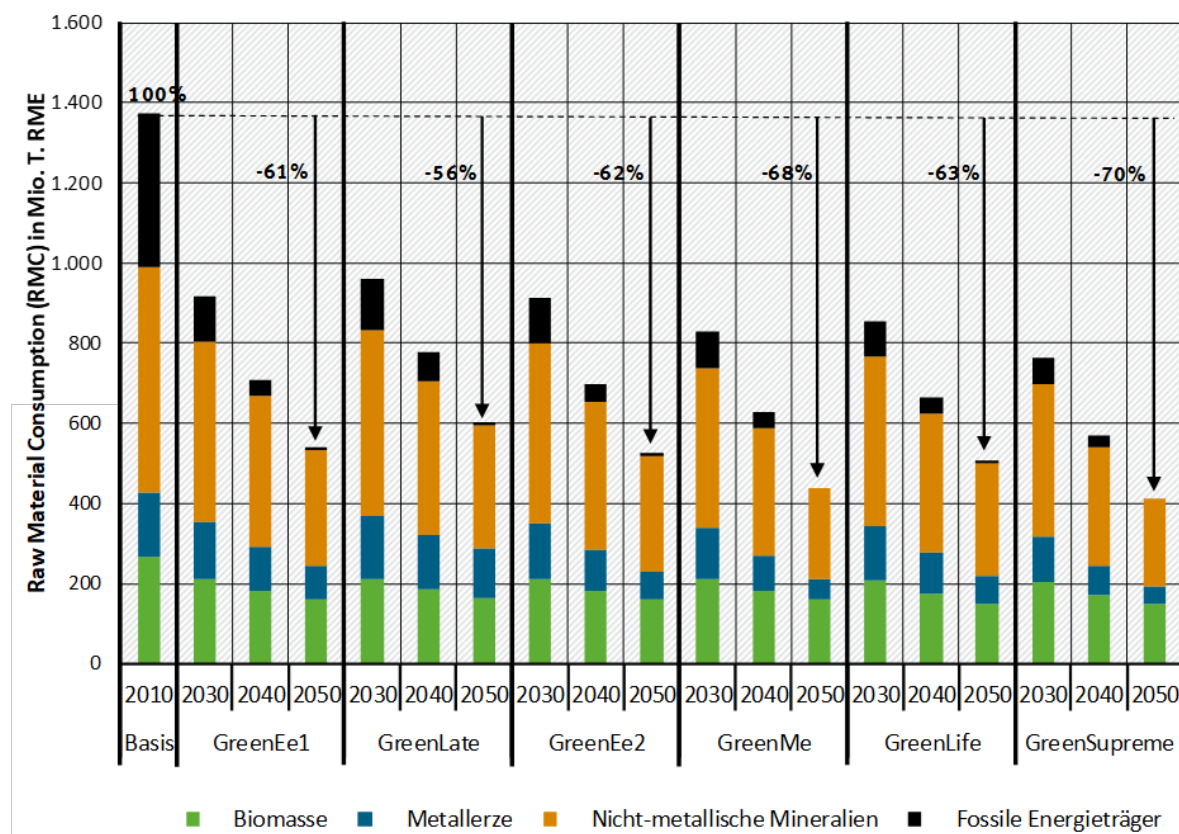
Andererseits erfordern die Transformation zur Treibhausgasneutralität und die damit verbundene Umstrukturierung des Energiesystems erhebliche rohstoffliche Veränderungen, z. B. wegen des erforderlichen Ausbaus von Windkraftanlagen und Photovoltaik sowie den Umbau von Infrastrukturen (im Energiesektor aber auch in anderen Sektoren). Dies resultiert zumindest für einzelne Gütergruppen in einem erhöhten Rohstoffbedarf zum Aufbau der neuen Infrastrukturen und Anlagen; besonders relevant ist hier die Nachfrage nach Metallen. Die genannten Gütergruppen bilden jedoch anthropogene Lager und die darin gebundenen Materialien werden nicht verbraucht. Durch Rückbau, Ertüchtigung und Sanierung von

Infrastrukturen werden nach der Nutzungsphase Sekundärmaterialien aus dem anthropogenen Lager freigesetzt, welche zur Wiederverwendung, ein Recycling oder eine sonstige Verwertung teilweise wieder zur Verfügung stehen<sup>154</sup> (siehe auch Kapitel 3 für eine Übersicht von Wechselwirkungen zwischen dem Energie- und Materialsystem).

#### 6.2.1.1 Primärrohstoffkonsum (RMC)

Im Ausgangsjahr 2010 liegt Deutschlands jährlicher Primärrohstoffkonsum (RMC) inklusive Vorleistungen im Ausland bei 1,37 Mrd. t und wird mengenmäßig dominiert durch nicht-metallische Mineralien und fossile Rohstoffe (Abbildung 6-16). Insgesamt senkt sich in allen Szenarien durch eine Kombination der verschiedenen Ansätze der Primärrohstoffkonsum bis 2050 deutlich, um -56 % (GreenLate) bis -70 % (GreenSupreme). Der Rückgang des Konsums von abiotischen Rohstoffen ist noch deutlicher ausgeprägt, er geht um mindestens -60 % (GreenLate) und maximal -76 % (GreenSupreme) zurück.

Abbildung 6-16: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffkategorien in den Green-Szenarien



Hinweis: Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Mit den Änderungen in der Energieversorgung weg von der Nutzung **fossiler Energieträger** in allen Szenarien, geht anteilig die größte Reduktion des Rohstoffbedarfs einher. Durch die Umstellung der Energieversorgung vollständig auf erneuerbare Energien, also auch in nicht-energetischen Anwendungen fossiler Energieträger, sinkt bis 2050 auch die rohstoffliche Nutzung von fossilen Rohstoffen, wie z. B. Naphtha. Langlebige Produkte der chemischen Industrie werden bereits ab 2030 mit erneuerbaren strombasierten Ausgangsstoffen hergestellt

<sup>154</sup> Vgl. (UBA, 2016b).



(vgl. Kapitel 5.2.4.1). Im Jahr 2050 verbleibt in den Szenarien GreenEe1, GreenLate, GreenEe2 und GreenLife nur noch eine geringe Menge an fossilen Rohstoffen (ca. 5,5 bis 8,1 Mio. t). Ursächlich hierfür ist die Annahme einer verzögerten Umstellung auf erneuerbare Energien im Rest der Welt (siehe Kapitel 3.1). Dies bedeutet, dass weiterhin fossile Rohstoffe z. B. bei der Herstellung von Gütern im Ausland eingesetzt und durch Importe dem Konsum in Deutschland zugerechnet werden. Die rohstoffliche Nutzung fossiler Energieträger in den importierten Produkten ist hingegen vernachlässigbar<sup>155</sup>. In den Szenarien GreenMe und GreenSupreme wird bis 2050 global ein zeitgleicher Ausstieg aus den fossilen Energieträgern angenommen, wodurch die fossilen Energieträger im RMC bis 2050 vollständig entfallen.

Ein markanter Rückgang erfolgt auch beim Einsatz **nichtmetallischer Mineralien** (insbesondere Sand, Kies, Kalkstein, etc.). Ihre Inanspruchnahme betrug im Jahr 2010 etwa 0,56 Mrd. t und verursachte damit 41 % des RMC. Der Konsum nichtmetallischer Mineralien sinkt in allen Szenarien, und liegt in einem Bereich von 0,22 Mrd. t in GreenSupreme bis 0,31 Mrd. t in GreenLate in 2050. Dieser Rückgang basiert u. a. auf der deutlich verringerten Nutzung von Baumineralien im Bausektor (vgl. Kapitel 5.3.5). Insbesondere die Annahmen zur Entwicklung der Wohnfläche (Kapitel 5.3.3.1) und zur Reduktion der Flächenneuanspruchnahme durch Siedlungen und Verkehr in allen Szenarien auf 0 ha/Tag bis 2050 (Kapitel 5.3.2) haben relevante Auswirkungen auf die Rohstoffbedarfe in Hoch- und Tiefbau. Ebenso sind die szenariospezifischen Annahmen zum Sekundärrohstoffeinsatz, zur Materialsubstitution und der Materialeffizienzsteigerung von Bedeutung, wie z. B. der Vergleich von GreenLate und GreenMe verdeutlicht (vgl. Kapitel 5.3.3.2 und Kapitel 5.3.5).

Die in den Szenarien angenommenen Umstellungen der Ernährung, insbesondere der verringerte Fleischkonsum in Verbindung mit einem reduzierten Tierbestand (Kapitel 5.7.9), trägt wesentlich zum Rückgang der **Biomassenutzung** von 266 Mio. t in 2010 auf 150 (GreenLife und GreenSupreme) bis 163 Mio. t (GreenLate) in 2050 bei. So bewirken die Annahmen im GreenEe1-Szenario zum Bevölkerungsrückgang einen um 24 Mio. t verringerten Biomassebedarf für Nahrungsmittel und die gesündere Ernährung einen Rückgang des RMC um ca. 42 Mio. t bis 2050. Auch der Verzicht auf den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung nach 2030 (Kapitel 5.2.3.2.7) trägt zum Rückgang der Biomassenutzung bei. Ein wesentlicher Anteil der Verringerung des Biomassebedarfs bis 2030 von 62 Mio. t in GreenSupreme bis 54 Mio. t in GreenLate ist hierauf zurückzuführen. Umgekehrt erhöhen die Annahmen zum zunehmenden Holzbau in allen Green-Szenarien außer GreenLate sowie die Substitution von abiotischen Materialien vor allem durch Holz (z. B. Dämmstoffe und Masten für Stromleitungen) den Biomassebedarf, insbesondere in GreenMe und GreenSupreme. Dieser Effekt nimmt jedoch aufgrund der unterstellten Wohnflächenentwicklungen und der damit verbundenen Neubauaktivitäten nach 2030 kontinuierlich ab (Kapitel 5.3.3.2).

Zu den wesentlichen Rohstoffen, welche für den Umbau hin zu einer weitestgehend treibhausgasneutralen und ressourceneffizienten Volkswirtschaft benötigt werden, gehören auch die **Metalle** und ihre Verbindungen. Dies gilt gleichermaßen für Eisen und Stahl, beispielsweise für technische Infrastrukturen und energieeffiziente Gebäude, wie für Nichteisenmetalle, etwa Kupfer und Aluminium in Stromleitungen, Spulen und erneuerbaren Energiesystemen insgesamt sowie eine Reihe von speziellen Technologiemetallen/-materialien. Letztere finden vielfältige Anwendung in Batterien (Lithium, Kobalt, Graphit), Magneten für Generatoren (Seltene Erden), als Legierungsmetalle (Nickel, Niob, Beryllium, Kobalt, Gallium, etc.) und in elektronischen Geräten und Anlagen (z. B. Tantal in Kondensatoren, Silizium in Photovoltaikanlagen). Diese Materialien werden in den Anlagen und der Infrastruktur langfristig

<sup>155</sup> Wäre der Beitrag der rohstofflichen Nutzung nicht vernachlässigbar, würde dies u. a. auch zu Treibhausgasen nach 2050 durch die Verwertung und Entsorgung dieser Produkte führen.

(über die Lebensdauer der Anwendungen hinweg) gebunden und stehen somit dem Wirtschaftskreislauf bei Wiederverwendung und Recycling weiterhin zur Verfügung. In den Szenarien senkt sich die Inanspruchnahme von Metallerzen von 162 Mio. t in 2010 auf 124 Mio. t (GreenLate) bis 43 Mio. t (GreenSupreme) in 2050. Dies entspricht einer Reduktion um -24 % bis -74 % im Vergleich zu 2010. Dabei reduziert sich die Inanspruchnahme bis 2030 durch den Mehrbedarf an metallischen Rohstoffen für den Umbau der Volkswirtschaft nur um rund -4 % bis -29 %, wohingegen 2040 bereits eine Reduktion um -16 % bis -53 % erreicht wird. Im GreenLate Szenario verzögert sich der Umbau und nimmt erst nach 2030 Fahrt auf. Zusätzlich zur gesamtwirtschaftlichen Betrachtung in Form des RMC ist eine Einzelbetrachtung von ausgewählten Rohstoffen sinnvoll, denn die Transformation zu einer weitestgehend treibhausgasneutralen Wirtschaft kann im Zeitverlauf auch zu Mehrbedarfen einzelner Technologiemetalle führen. Eine solche Betrachtung findet sich in Kapitel 6.2.3.

### Dekomposition der Veränderung des inländischen Materialkonsums bis 2050

Relevanten Einfluss auf die Höhe des inländischen Rohstoffkonsums haben auch die übergreifenden Annahmen die je nach Charakteristik der Green-Szenarien variieren. Hierzu zählen vor allem die Annahmen zur Steigerung der Recyclingraten und der Rezyklateinsatzmengen (Tabelle 6-5), der Materialeffizienz und zur Entwicklung des technologischen Stands in und außerhalb Europas (Tabelle 6-4). Auch die unterstellte Wachstumsbefreiung in GreenSupreme ist für den Rohstoffbedarf dieses Szenarios von Relevanz. So findet bspw. im GreenEe1-Szenario ein Rückgang von ca. 24 Mio. t Nahrungsmitteln durch den Bevölkerungsrückgang und ca. 42 Mio. t insbesondere durch gesündere Ernährung statt. Der Rest ist divers und kann nicht eindeutig zugeordnet werden.

**Tabelle 6-4: Annahmen zur Materialeffizienz und technologischen Entwicklung global in den Szenarien**

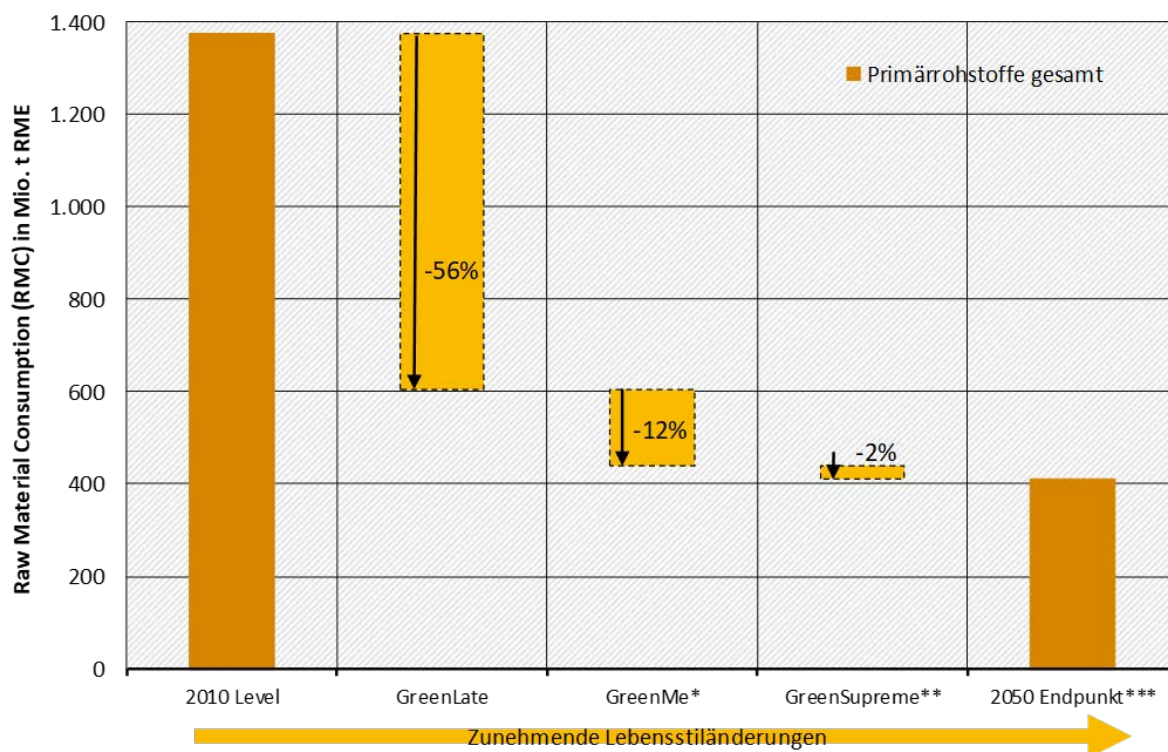
Material	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Steigerung der Materialeffizienz pro Jahr	1,1 %	0,9 %	1,2 %	1,1 %	1,2 %
Entwicklung im Rest der Welt in 2050	Verzug 10 J.	Verzug 10 J.	entspricht D	Verzug 10 J.	entspricht D

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Der Umbau der Energieversorgung erfolgt in allen Green-Szenarien hin zu einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden System bis 2050. Wie in Kapitel 6.1 gezeigt, ist allen Szenarien gemein, dass sie für 2050 ein treibhausgasneutrales Deutschland darstellen. Bereits im GreenLate-Szenario findet – mit einer Verzögerung im Vergleich zu den anderen Szenarien – neben der Erschließung von Energieeffizienzpotentialen über alle Anwendungsbereiche hinweg auch eine kontinuierliche Fortsetzung einer anspruchsvollen Ressourcenschonungspolitik inkl. eines verstärkten Einsatzes von Sekundärrohstoffen und Materialsubstitution sowie erste Umstellungen hin zu nachhaltigeren Lebensstilen<sup>156</sup> statt. Daraus resultiert, dass der Rückgang im RMC bis 2050 bereits -56 % im Vergleich zu 2010 beträgt (Abbildung 6-17).

<sup>156</sup> Da im GreenLate-Szenario der Fokus auf technischen Maßnahmen liegt, sind nur einige Aspekte nachhaltigerer Lebensstile in diesem Szenario einbezogen, insbesondere die Reduktion des Fleischkonsums und die Ansätze zur Verkehrswende durch Vermeidung und Verlagerung. Diese finden allerdings aufgrund einer späteren Umstellung zeitverzögert im Vergleich zu den anderen Szenarien statt.

**Abbildung 6-17: Dekomposition der Beiträge von Materialeffizienz, zusätzlichen Lebensstiländerungen und weiteren Annahmen zur Reduktion des RMC im GreenSupreme-Szenario in 2050**



\*Das GreenMe-Szenario beinhaltet einen schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien verbunden mit einem reduzierten Handelsüberschuss (analog GreenEe2) sowie verstärkte Materialeffizienzmaßnahmen (rund 1 % des Rückgangs im RMC sind auf den Rückgang des Handelsüberschusses zurückzuführen).

\*\*Zusätzliche Lebensstiländerungen (GreenLife) und schnellerer Ausbau (zusammen entspricht dies dem GreenSupreme Szenario).

\*\*\*Entspricht dem RMC des GreenSupreme-Szenarios in 2050.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Ein schnellerer Ausbau der erneuerbaren Energien verbunden mit Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz, ergänzt um weitere Aspekte nachhaltiger Lebensstile<sup>157</sup>, haben das Potential, den Materialkonsum um weitere -12 % zu senken (GreenMe). Diese beinhalten u. a. die Ausschöpfung des ökologisch-technischen Recyclingpotenzials, deutlich ausgeprägter Materials substitution im Vergleich zu GreenLate und der Einsatz innovativer Materialien wie Textilbeton sowie verstärkter Holzbau. Zusätzlich wird angenommen, dass auch global zusätzliche Anstrengungen zur Erhöhung der Materialeffizienz wie in Deutschland getroffen werden und somit sich auch in den mit den Importen verbunden Produkten eine ambitionierte Ressourcenschonungspolitik niederschlägt.

Wie oben diskutiert wurden schon in GreenLate relevante Lebensstiländerungen unterstellt und diese in GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe nochmals anspruchsvoller ausgestaltet (siehe Kapitel 3.1). Hierdurch wurden bereits relevante Aspekte für eine Reduktion des RMC durch Lebensstiländerungen in diesen Szenarien berücksichtigt. Darüber hinausgehende ambitionierte Lebensstiländerungen wie eine gegenüber heute reduzierte Pro-Kopf-Wohnfläche, die Bevorzugung langlebiger Produkte und die hauptsächliche Nutzung von Gütern im Rahmen von Sharingangeboten (GreenLife), sowie ein noch ambitionierterer Umbau des Energiesystems

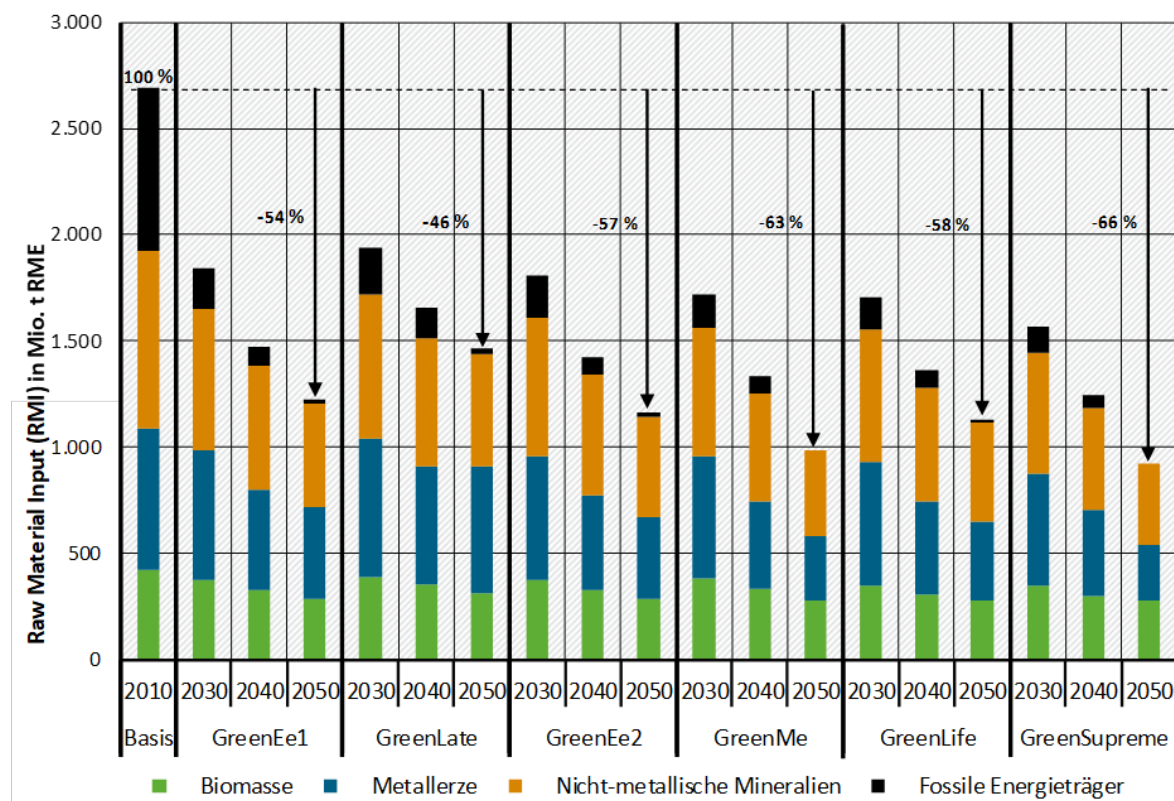
<sup>157</sup> Hierzu zählt beispielsweise auch die im Vergleich zu GreenLate geringere Wohnfläche oder eine stärkere Änderung des persönlichen Mobilitätsverhaltens.

verbunden mit einer Befreiung vom Wirtschaftswachstum, eine Reduktion des Materialkonsums um weitere -2 % bis 2050 zu erreichen (GreenSupreme).

#### 6.2.1.2 Primärrohstoffeinsatz (RMI)

Weiterer Bestandteil der Materialflussrechnung ist der Primärrohstoffeinsatz (RMI), welcher ergänzend in Abbildung 6-18 dargestellt ist.

**Abbildung 6-18: Raw Material Input (RMI) nach Rohstoffkategorien in den Green-Szenarien**



Hinweis: Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Der RMI lag im Jahr 2010 bei rund 2,7 Mrd. t und zwischen 0,9 bis 1,5 Mrd. t in den Green Szenarien in 2050. Dies entspricht einer Reduktion um -46 % in GreenLate bis -66 % in GreenSupreme von 2010 bis 2050. Ebenso wie beim Primärrohstoffkonsum ist auch beim Primärrohstoffeinsatz der Rückgang in allen Szenarien bis 2030 im Wesentlichen durch den Ausstieg aus der energetischen Nutzung fossiler Energieträger zu erklären.

Insgesamt ist erkennbar, dass erwartungsgemäß die Annahme zur technologischen Entwicklung außerhalb Europas einen stärkeren Einfluss auf den Primärrohstoffeinsatz hat als auf den Primärrohstoffkonsum. So zeigen GreenMe und GreenSupreme eine wesentlich höhere Reduktion in 2050 gegenüber 2010 als die weiteren Szenarien.

#### 6.2.2 Zirkularität der deutschen Volkswirtschaft

Die Ergebnisse der Green-Szenarien zeigen, dass Deutschland auch im Jahr 2050 weiterhin einen relevanten Input an Primärrohstoffen in der Größenordnung von 411 Mio. t in GreenSupreme und bis zu 603 Mio. t in GreenLate benötigt. Das Konzept einer Kreislaufwirtschaft (engl. circular economy) zielt aus Sicht der Europäischen Kommission darauf ab, den Wert von Produkten,

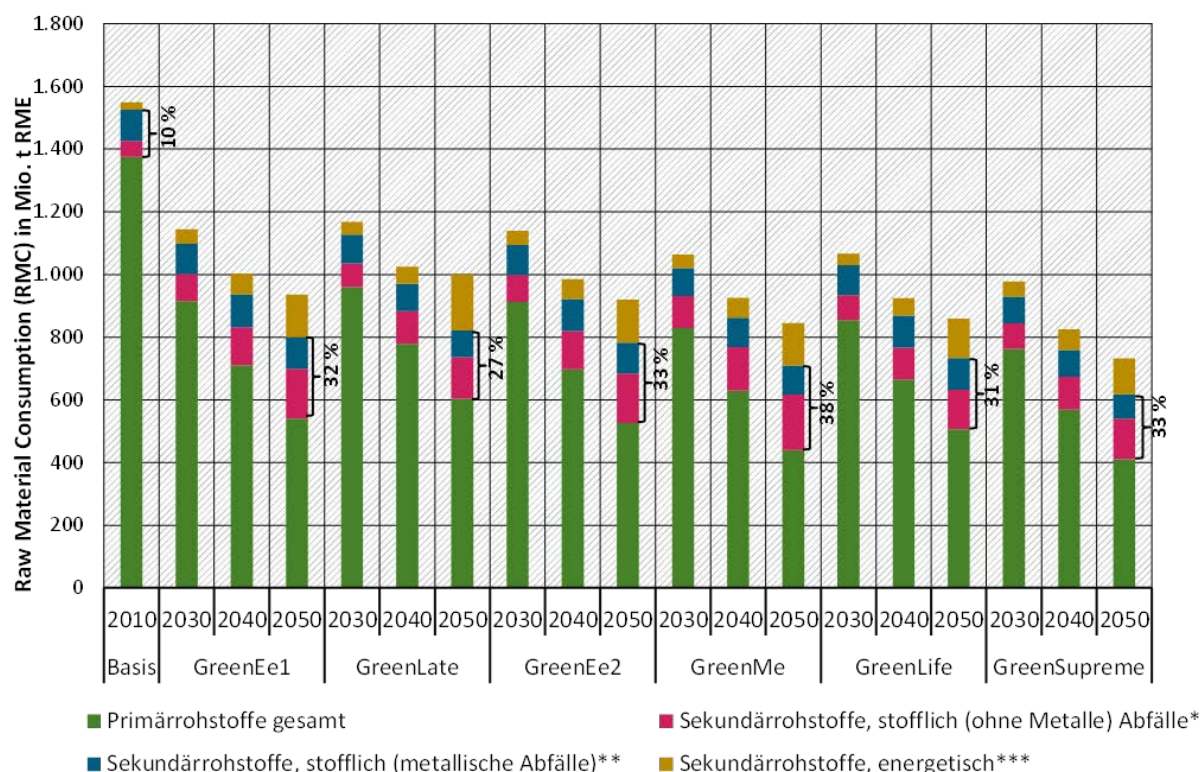


Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen (EK, 2015). Durch das Verlangsamen, Verringern und Schließen von Energie- und Materialkreisläufen kann nicht nur die Ressourceneffizienz gesteigert, sondern die Ressourceninanspruchnahme (Rohstoffe, Wasser, Fläche etc.) insgesamt gesenkt werden.

Der Erfolg der Kreislaufwirtschaft zur Ressourcenschonung bemisst sich an der Fähigkeit, den Output von Materialien als Abfälle in letzte Senken zu reduzieren und gleichzeitig eine Schadstoffanreicherung in den Stoffkreisläufen zu verhindern. Die in Produkten enthaltenen Materialien sollen dabei möglichst in ihrer bisherigen Funktionalität in einem Materialkreislauf gehalten werden. Auf diese Weise können die Ressourcenpotenziale der Abfälle möglichst weitgehend genutzt werden, um den Einsatz von Primärrohstoffen und damit verbundene Umweltauswirkungen zu reduzieren (UBA, 2015e). Wichtig ist die Frage, in welchem Umfang Abfälle nicht nur ordnungsgemäß behandelt werden, sondern daraus auch qualitätsgesicherte Sekundärrohstoffe und Produkte erzeugt werden können. Folglich ist es ein wichtiger Gradmesser für die Zirkularität einer Volkswirtschaft, wie hoch der Anteil an Sekundärmaterialien am gesamten Materialeinsatz der Volkswirtschaft bzw. dem Einsatz einzelner relevanter Materialien ausfällt.

In dieser Studie unter Verwendung des IOT-Modells URMOD wird das derzeitige und zukünftige Aufkommen an Sekundärrohstoffen nicht unmittelbar berechnet. Exogen wurden die relevanten Mengen verwerteter Abfälle integriert, um die damit erzielten Substitutionseffekte auf Primärrohstoffe abbilden zu können. Mithilfe von modellexogenen Annahmen zukünftiger Recyclingraten und der Rezyklatanteile in relevanten Materialströmen wie Stahl und Kupfer ist dennoch eine Abschätzung des Anteils der Sekundärmaterialien am Rohstoffkonsum möglich. Entsprechend der Szenariencharakteristika wurden die genannten Recyclingparameter variiert.

Im Ergebnis betrug der Anteil an Sekundärmaterialien für inländischen Konsum und Investitionen in RME im Basisjahr 2010 für Deutschland etwa 11 %. Davon entfallen rund 10 % auf die stoffliche Verwertung von Sekundärmaterialien und 1 % auf die energetische Nutzung zur Substitution fossiler Energieträger, siehe Abbildung 6-19. Diese 11 % entsprechen rd. 175 Mio. t Primärrohstoffen, um welche der RMC ohne die inländische Sekundärrohstoffwirtschaft und ohne Rezyklatgehalte in den Importen erhöht wäre.

**Abbildung 6-19: Inländischer Materialkonsum in RME und Anteil an Sekundärmaterialien in den Green-Szenarien**

\*Holz, Papier, Kunststoffe und mineralische Abfälle zur Verwertung im Hoch- und Tiefbau, ohne Abfälle, die direkt auf der Baustelle verwertet wurden (sog. closed loops).

\*\* Eisen-, Kupfer-, Aluminiumschrotte

\*\*\*Tonnen Rohöläquivalente (theoretischer Wert um Substitutionseffekte zu quantifizieren)

Hinweis: Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Dies entspricht der Systematik des Indikators DIERec (Direct and Indirect Effects of Recovery), welcher die Schonung von Primärrohstoffen durch Kreislaufführung beschreibt. Er bildet ab, in welchem Umfang Primärrohstoffe unter Annahme gleicher Produktionsmuster und Technologien global gewonnen werden müssten, wenn keine Verwertung von Sekundärrohstoffen erfolgen würde (UBA, 2019n). Der DIERec für 2010 in Deutschland wurde für 30 mengenrelevante Sekundärmaterialien (Abfälle und industrielle Nebenprodukte) auf 459 Mio. t RME taxiert. Dies entspricht rund 18 % des RMI desselben Jahres in Höhe von 2.622 Mio. t RME. Werden diese Effekte gleichermaßen auf die Exporte und die inländische letzte Verwendung umgelegt, so ergäbe sich für 2010 ein Anteil von 26 % an Sekundärmaterialien für inländischen Konsum und Investitionen in RME – analog zu den oben aufgeführten 11 %. Dies zeigt, dass die Sekundärmaterialien mitsamt ihren Effekten der Green-Szenarien im Ausgangsjahr der Szenario-Berechnungen in diesem Projekt eine defensive Abschätzung darstellen, da einige für das Recycling wichtige und rohstoffintensive Materialien (z. B. Silber, Zink, Nickel, Asphalt etc.) und sogenannte closed-loops, d. h. industrie-interne Wiederverwertungen, die bspw. im Bausektor relevant sind, nicht enthalten und auch Verwertungswege nicht differenziert betrachtet werden konnten.

Im Zeitverlauf steigt der Anteil der durch Sekundärrohstoffe substituierten bzw. eingesparten Primärrohstoffe am Materialkonsum in RME jedoch deutlich an. Zum einen werden in den Szenarien höhere Verwertungsquoten und Rezyklatgehalte in einigen Materialströmen angenommen. Dies gilt gleichermaßen für den Rest der Welt und die von dort nach Deutschland

exportierten Güter. Zum anderen sinkt wie in Kapitel 6.2.1 gezeigt, der inländische Primärrohstoffkonsum ebenfalls deutlich. Durch die stoffliche Nutzung von Sekundärrohstoffen kann 2050 der inländische Materialkonsum in RME im Umfang von 27 % in GreenLate bis 38 % in GreenMe vermieden werden. Der stärkere Recyclinganteil in GreenMe im Vergleich zu GreenSupreme beruht auf einem geringeren Gesamtbedarf an Materialien im GreenSupreme-Szenario. Werden auch energetische Verwertungen berücksichtigt, so steigt dieser Anteil auf 40 % bis 48 %.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, dass Deutschland unter Annahme sehr ambitionierter Recyclingvorgaben weltweit (siehe Tabelle 6-5 für einen Überblick der Recyclingannahmen in den Szenarien) im Jahr 2050 ein sehr viel höheres Maß an Zirkularität erreichen kann<sup>158</sup>. Relativ wird dies bereits durch den Ausstieg aus der energetischen Nutzung fossiler Energieträger erreicht, wodurch der inländische Primärrohstoffkonsum am signifikantesten sinken wird.

Ein Bedarf an Primärrohstoffen wird dennoch vor allem für das Bedürfnisfeld Ernährung und durch Wachstumseffekte, funktionale Verluste, Downcycling und dissipative Verwendungen von Materialien erforderlich bleiben. Dissipative Verluste von Materialien lassen sich während der Bereitstellung von Materialien, Herstellung und Nutzungsphase von Produkten, Instandhaltung von Anlagegütern und Infrastrukturen sowie im Abfallmanagement zwar minimieren, sind aber technologisch und thermodynamisch nicht gänzlich zu vermeiden (Cullen, 2017; Mayer et al., 2019).

Darüber hinaus sind Güter- und Materialverweilzeiten sowie Dynamiken im anthropogenen Lager richtungsentscheidend (Lanau et al., 2019). Das anthropogene Lager ist überwiegend durch eine hohe materielle Remanenz geprägt. Rund 98 % des anthropogenen Lagers werden durch Güter und Bauwerke des Hoch- und Tiefbaus gebildet. Sie erfahren zwar durch Sanierung und Ertüchtigung eine stete materielle Veränderung und generieren Materialzu- und abflüsse, aber das Gros der Materialien binden sie über viele Jahrzehnte in konstruktiven Elementen, bevor diese eine Verwertung erfahren können (UBA, 2017d). Hierzu kommen Wachstumseffekte. So lange die Zuflüsse in das anthropogene Lager die verwertbaren Abflüsse übersteigen, wird selbst eine idealtypische Recyclingrate von 100 % nicht zu einem gänzlichen Verzicht auf Primärrohstoffe führen. Noch 2010 stieg das anthropogene Lager in Deutschland deutlich an. So entstand beispielsweise auf drei Tonnen Materialeinsatz nur eine Tonne Abfall aus dem Hochbau. Dies wird sich erst langfristig nach 2030 ändern, wenn die Nachfrage nach Bauleistungen nicht mehr wachsen wird und durch den Rückbau des schneller gewachsenen Baubestands seit den 1960er Jahren mit einer Angleichung des Verhältnisses und sogar einer Umkehr gerechnet werden kann (Deilmann et al., 2014; UBA, 2017d).

**Tabelle 6-5: Annahmen zum Recycling im Jahr 2050**

Material	Art des Indikators	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
Eisen	Rezyklatanteil*	67 %	50 %	67 %	67 %	67 %
Kupfer, Aluminium, Blei, Zink	Rezyklatanteil*	90 %	70 %	90 %	90 %	90 %
Technologiemetalle****	Recyclingrate**	+10 %	+5 %	+25 %	+10 %	+25 %

<sup>158</sup> Dabei bleibt zunächst außer Betracht, ob insbesondere bei auch global ambitionierten Recyclingvorgaben ausreichend Sekundärmaterialien entsprechend der Nachfrage und zum entsprechenden Zeitpunkt verfügbar sind.

Material	Art des Indikators	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
Papier	Recyclingrate	+10 %	+10 %	+10 %	+10 %	+10 %
Altholz	Recyclingrate	-	-	50 %	-	50 %
Kunststoffe (post consumer)	Recyclingrate	-	-	75 %	65 %	75 %
Mineralische Abfälle	Ambitionsniveau im Recycling***	Hoch	niedrig	Hoch	hoch	hoch

\*Anteil Sekundärmaterial im Gesamtinput

\*\*Erhöhung im Vergleich zu 2010

\*\*\*Mittelwert verschiedener Bausektoren (Hochbau 13, Straße 3, Schiene 1)

\*\*\*\*Gold, Silber, Nickel, Platin, Zink, Zinn, Wolfram, Tantal, Magnesium, Titan, Mangan, Chrom

Leerzellen stehen für gleichbleibend gegenüber 2010.

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

## 6.2.3 Nachfrage nach einzelnen Rohstoffen für die Transformation

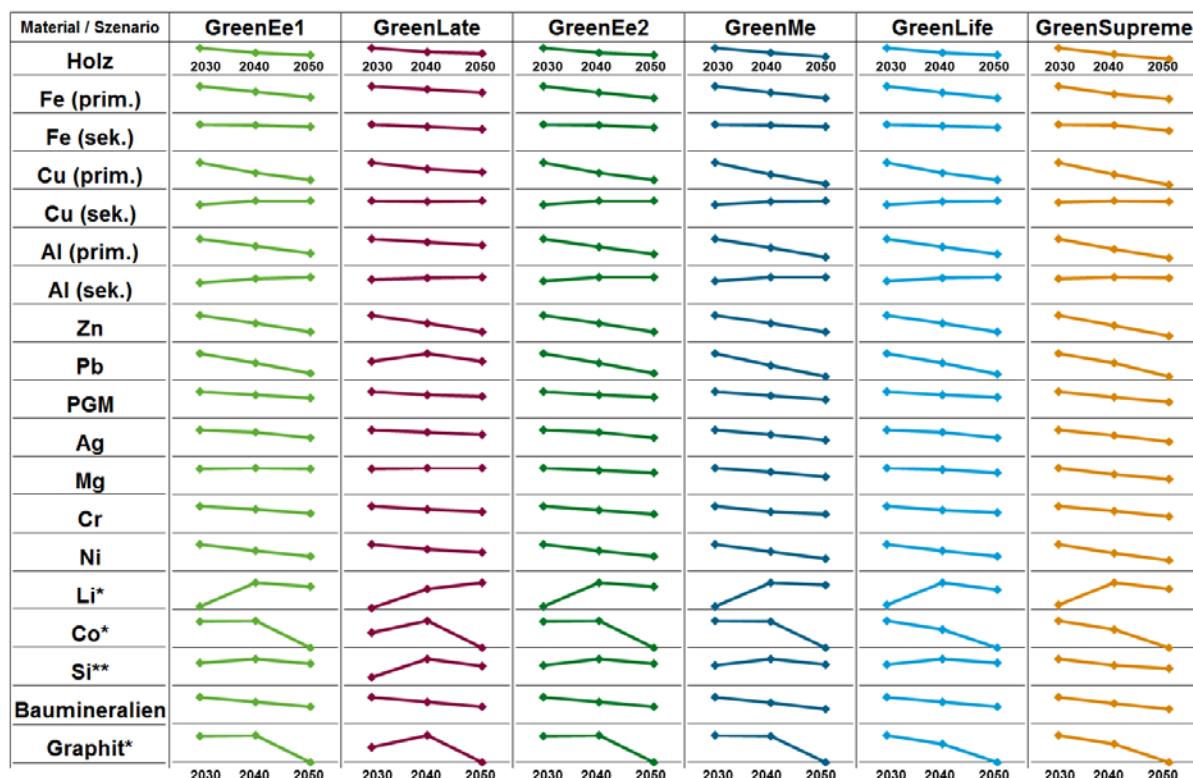
### 6.2.3.1 Übersicht über relevante Einzelrohstoffe

Die Richtungstendenz der Nachfrage nach einzelnen ausgewählten Rohstoffen in den Stützjahren 2030 und 2040 sowie im Endpunkt 2050 ist in Abbildung 6-20 dargestellt. Aufgrund der Auflösung (Differenzierung zwischen einzelnen Materialien) in den Input-Output Tabellen in URMOD, konnte eine begrenzte Anzahl an Rohstoffen aus der Konsumperspektive (inländischer Konsum und die Investitionen, die Exporte sind nicht enthalten) einzeln abgebildet werden. Die unten dargestellte Auswahl basiert auf aktuellen Kritikalitätsstudien zu möglichen sozio-ökonomischen (z. B. (EK, 2017)) sowie ökologischen Knappheiten (UBA, 2015c) und beinhaltet folgende Materialien: Holz, Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Aluminium (Al), Zink (Zn), Blei (Pb), Platin Gruppen Metalle (PGMs), Silber (Ag), Magnesium (Mg), Chrom (Cr), Nickel (Ni), Lithium (Li), Kobalt (Co), Siliziummetall (Si), Baumineralien und Graphit.

Weitere Rohstoffe, die relevant für den Transformationspfad sind, konnten mit dem Modellierungsansatz nicht quantitativ beschrieben werden. Dazu gehören u. a. Materialien wie seltene Erden (Neodym) für Magneten in Windkraftanlagen oder Legierungsmetalle für Stahl- und Superlegierungen (z. B. Re, V, Mo, etc.) etc.



**Abbildung 6-20: Richtungstendenz in der Inanspruchnahme (letzte Inländische Verwendung) einzelner Rohstoffe im Zeitraum 2030 bis 2050 anhand von Sparklines**

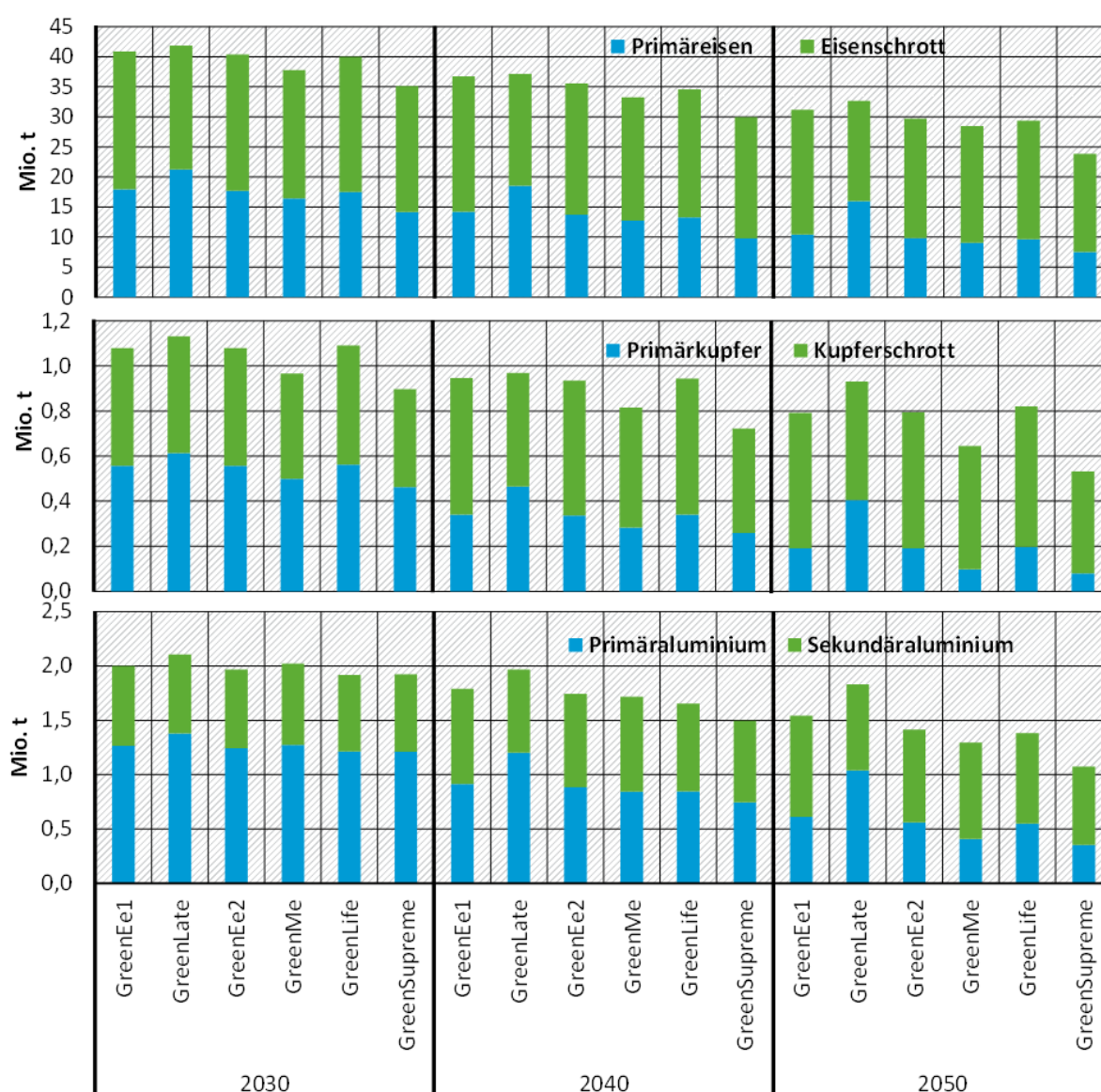


\*Sonderrechnung basierend nur auf der Nachfrage nach Batterien für die E-Mobilität.

\*\*Sonderrechnung basierend nur auf der Nachfrage in PV-Modulen.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) (Daten für das Ausgangsjahr 2010 lagen bei der Erstellung des Berichts nicht vor.)

Die Gesamtnachfrage nach den Basismetallen Eisen, Kupfer und Aluminium nimmt im Zeitverlauf deutlich ab. So liegt im Jahr 2050 in GreenSupreme die inländische Nachfrage nach Eisen noch bei 35 Mio. t und reduziert sich bis 2050 um 32 % auf ca. 24 Mio. t (Abbildung 6-21). Für Kupfer beträgt die Reduktion im Zeitverlauf 2030 bis 2050 ca. 41 % und für Aluminium 44 %. Die Abbildungen zeigen auch, dass der Anteil an eingesetzten Sekundärmaterialien im Zeitverlauf entsprechend der Annahmen zur Erhöhung der Rezyklatanteile für die drei Basismetalle zunimmt. Auch der Rezyklatanteil beim Eisen steigt, aber die sinkende Gesamtnachfrage nach Eisen (primär und sekundär) dominiert die Nachfrage nach Eisenschrotten (siehe auch Kapitel 6.2.2).

**Abbildung 6-21: Letzte inländische Verwendung von Eisen, Kupfer und Aluminium**

Hinweis: Angabe Mio. Tonnen Metallgehalt.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e) (Daten für das Ausgangsjahr 2010 lagen bei der Erstellung des Berichts nicht vor.)

Auch die Nachfrage nach Blei nimmt im GreenLate Szenario bis 2040 zu und erst im Zeitraum 2040-2050 ab. Hier zeigt sich u. a. der Bedarf an Blei in Hochseekabeln zum Anschluss von Windparks auf See. Der Ausbau der Windenergie auf See beginnt entsprechend der Szenariocharakteristik in GreenLate verzögert und dann in stärkerem Maße (vgl. Kapitel 5.2.3.2.4). In allen anderen Szenarien nimmt die Nachfrage nach Blei im Zeitverlauf ab.

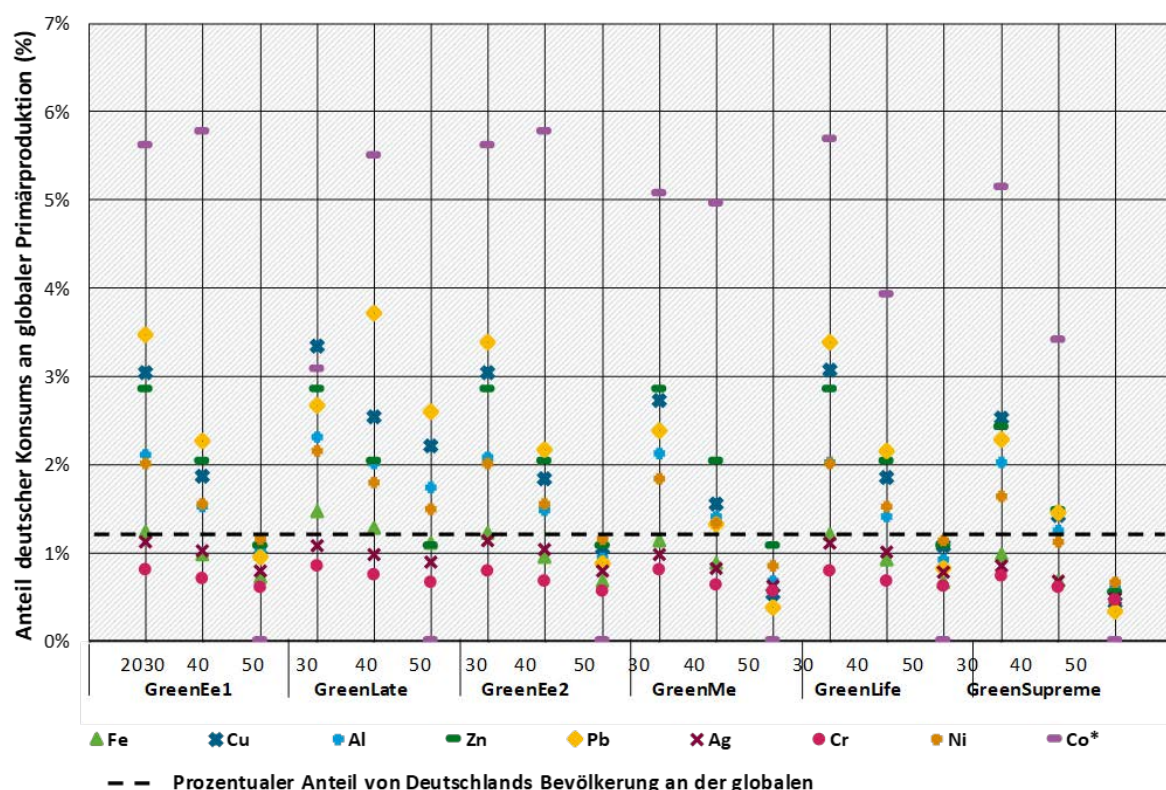
Die Nachfrage nach Kobalt und Graphit in Akkumulatoren zur Elektrifizierung des Transportsektors nimmt im GreenLate-Szenario von nahezu keinem Bedarf in 2010 bis zum Jahr 2040 zu und sinkt in den folgenden Jahren bis 2050 durch den zunehmenden Einsatz von Lithium-Schwefel-Akkus (Li-S-Akkus) ab. Im Projekt wurde angenommen, dass Li-Schwefel-Akkus verstärkt ab 2040 zum Einsatz kommen und im Jahr 2050 Akkumulatoren basierend auf Kobalt und Graphit ersetzt haben. Der Bedarf nach Lithium nimmt folglich im Zeitverlauf bis 2040 zu und bleibt danach bis 2050 weitestgehend konstant. Während in GreenLate der größte

Zuwachs an E-Mobilität nach 2030 stattfindet (verspätetes Ambitionsniveau und höherer Bedarf aufgrund höherer PKW-Zahlen), erfolgt dies in allen anderen Szenarien schon bis 2030 (der Zeitraum 2010 bis 2030 ist nicht explizit in der Abbildung dargestellt).

In den Szenarien wird angenommen, dass für die Energieversorgung im Wesentlichen kristalline Photovoltaikmodule (Silizium-basiert) Anwendung finden. Im Sinne der Szenariencharakteristika wird in den Szenarien GreenMe und GreenSupreme ein besonders rohstoffeffizienter Pfad mit Dachanlagen mit Dünnschichtmodulen mit amorphen Siliziumzellen sowie bifazialen Zellen in Freilandanlagen unterstellt, da diese einen noch geringeren Rohstoffaufwand haben (siehe auch Kapitel 5.2.3.2.3). Während in GreenMe und GreenSupreme der (Brutto-)Ausbau von PV nach 2040 sich verlangsamt, beschleunigt sich dieser in den weiteren Szenarien insbesondere GreenLate nochmals zwischen 2040 und 2050. So liegt in GreenLate der durchschnittliche Bruttoausbau pro Jahr im letzten Jahrzehnt der Betrachtungen fast doppelt so hoch wie in GreenMe. Zusätzlich wirken in den beiden erst genannten Szenarien die niedrigeren Rohstoffbedarfe der unterstellten Techniken sowie die insgesamt geringere installierte Leistung an PV (in GreenSupreme rund die Hälfte der installierten Leistung von GreenLate) mindernd auf den Siliziumbedarf.

Der Konsum Deutschlands nach einzelnen Materialien ist in Abbildung 6-22 mit der globalen Primärproduktion im Jahr 2015/2016 (je nach Datenverfügbarkeit) verglichen.

**Abbildung 6-22: Anteil der letzten inländischen Verwendung (LIV) ausgewählter Materialien in Prozent an der globalen Produktion 2015/2016**



\*Bedarf nur für Batterien in Mobilität berücksichtigt.

\*\*Deutschlands Bevölkerung im Jahr 2010 lag bei 81,75 Mio. Personen und die globale Bevölkerung bei 6,96 Mrd. Personen (81,75 Mio. Personen / 6,96 Mrd. = 1,17 %).

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e). Globale Produktionsdaten vom US Geological Survey für das letzte verfügbare Jahr (USGS, 2019). Für Chrom wurden die Bergbaustatistiken für Chromit herangezogen und ein Metallgehalt von 30 % angenommen.

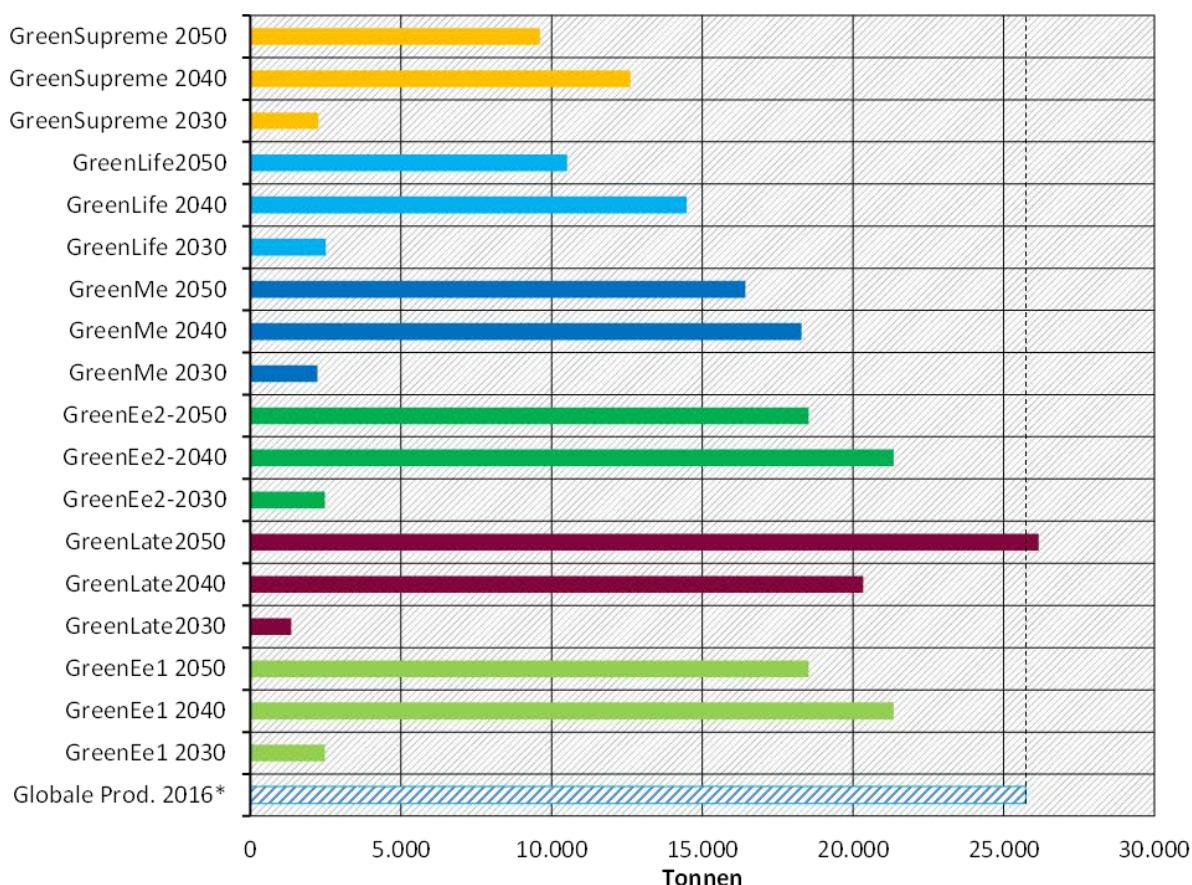
Deutschlands Rohstoffkonsum für die Metalle Eisen, Chrom, Silber und Nickel in den Jahren 2030 bis 2050 liegt im Vergleich zur aktuellen globalen Produktion bei rund 0,5 % bis 2 %. Dies entspricht in etwa auch Deutschlands Anteil an der globalen Bevölkerung (gestrichelte Linie in der Abbildung). Für Kupfer, Aluminium, Zink und Blei ist Deutschlands Konsum an Primärrohstoffen mit ca. 1 % bis 4 % der globalen Produktion in 2015/16 leicht darüber. Der Konsum von Primärkobalt für Batterien hingegen wird in den Jahren 2030 und 2040 auf etwa 3 % bis 6 % der aktuellen globalen Produktion geschätzt und liegt damit deutlich über dem gegenwärtigen Anteil Deutschlands an der globalen Bevölkerung. Auch die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) nimmt an, dass die Nachfrage nach Kobalt sich in den nächsten Jahrzehnten weiter erhöhen könnte (bis zu global 120.000 Tonnen im Jahr 2035 werden allein für wachstumsstarke Zukunftstechnologien veranschlagt, was 90 % der Weltproduktion 2013 entspricht) (Marscheider-Weidemann et al., 2016). Im den Green-Szenarien beträgt der jährliche letzte inländische Verwendung von Kobalt bis zu 7.287 Tonnen pro Jahr in 2040 (GreenEe1 und GreenEe2) und könnte damit einen beachtlichen Anteil an der globalen Primärproduktion (126.000 Tonnen in 2016 (Metallgehalt)) ausmachen.

Für Lithium liegt die globale Primärproduktion in 2016 bei ca. 26.000 Tonnen (Li-Gehalt) (USGS, 2016). Lithium wird aktuell vorwiegend in Australien, Chile und Argentinien gefördert. In den Green-Szenarien wird bis zum Jahr 2050 eine Zunahme der Nutzung von Lithium-Akkus im



Verkehrsbereich unterstellt. Der damit verbundene Lithiumkonsum ist in Abbildung 6-23 dargestellt<sup>159</sup>.

**Abbildung 6-23: Letzte inländische Verwendung von Lithium (Li) in Batterien (Sonderrechnung) im Vergleich zu globalen Produktionsdaten (in Metallgehalt) im Jahr 2016**



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e). \*Globale Produktionsdaten für 2016 stammen vom US Geological Survey (USGS, 2019) (ohne USA). Produktionszahlen für Lithiummineralien und –Salzlake wurde in Metallgehalt umgerechnet basierend auf (Graedel et al., 2015).

Im Jahr 2050 beträgt die Nachfrage nach Lithium für in Deutschland genutzte Li-Ionen Akkus ca. 9.600 in GreenSupreme bis 26.200 Tonnen pro Jahr in GreenLate. Auch im Stützjahr 2040 liegt der Bedarf für inländisch genutzte Akkumulatoren bei ca. 12.600 bis 21.300 Tonnen pro Jahr. Der nationale Bedarf an Lithium in 2050 entspricht einem Anteil von 37 % bis 102 % der momentanen global geförderten Menge an Lithium. Unter der Annahme, dass der Rest der Welt sich ähnlich wie Deutschland entwickelt, würde dies einen enormen Ausbau an Produktionskapazitäten für Lithium erfordern und wahrscheinlich nicht global übertragbar sein. Auch die DERA nimmt an, dass der globale Bedarf an Lithium im Jahr 2035 allein für eine Auswahl betrachteter Zukunftstechnologien (Li-Ionen Akkus und Airframe-Leichtbauten) bei bis zu 110.000 Tonnen liegen könnte (Marscheider-Weidemann et al., 2016). Dies entspricht mehr als dem vierfachen der momentanen Jahresproduktion.

Nicht berücksichtigt ist in den Abschätzungen in den Green-Szenarien jedoch die Nutzung von Sekundärlithium z. B. durch die mögliche Rückgewinnung aus Fahrzeugbatterien in der Zukunft. In den Szenarien werden second-life-Batterien als Speicher im Energiesektor unterstellt und der

<sup>159</sup> Es handelt sich hierbei um eine Sonderrechnung nur für Lithium in Batterien, d. h. andere Nutzungspfade (z. B. Keramik und Glas, Schmierfette, etc.) wurden nicht mit betrachtet.

Hochlauf von Fahrzeugen im Rest der Welt findet verzögert statt, so dass die Mengen an Lithium in 2050 noch weitestgehend im Bestand gebunden sind. Zusätzlich sind aktuell Recyclingkonzepte für Fahrzeugbatterien in der Entwicklung, so dass keine Abschätzungen zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen getroffen werden konnten. Es ist aber davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren entsprechende Konzepte und Anlagen Marktreife erreichen werden und somit der Bedarf teilweise auch durch Sekundärmaterialien gedeckt werden kann. Zukünftige Forschungsprojekte sollten sich verstärkt mit den Potentialen des Recyclings von Lithium (und anderen Materialien) aus second-life-Batterien befassen. Eine weitere Einschränkung der oben präsentierten Abschätzungen der Rohstoffbedarfe für Lithium und Kobalt ist, dass nur die Nutzung in Fahrzeugbatterien berücksichtigt wurde. Die Nachfrage nach diesen Rohstoffen in anderen Anwendungen könnte den Bedarf für beide Rohstoffe weiter erhöhen.

### 6.2.3.2 Substitution von Technologiemetallen

Für die Green-Szenarien bilden Schlüsseltechnologien für eine nachhaltige Entwicklung das Fundament. Doch Elektromotoren, Generatoren, Photovoltaik, Katalysatoren, LED-Beleuchtung oder auch Batteriespeicher basierend auf funktionalen Elementen wie Seltenen Erden, Zinn, Silber, Platin und Lithium, die abgesehen von den Sonderauswertungen zu Kobalt und Lithium modellbedingt nur in sehr grober Auflösung betrachtet werden konnten. Wenn diese Technologien nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit ausgebaut werden, wird sich die Nachfrage nach diesen Elementen – wie am Beispiel von Lithium gezeigt - vervielfachen.

Für einige Rohstoffe zeichnen sich schon heute geologische, strukturelle, geopolitische, sozioökonomische und ökologische Versorgungsrisiken ab, weshalb sie als „kritische Rohstoffe“ gelten (Kosmol et al., 2018). So ist die Gewinnung und Weiterverarbeitung einiger Technologiemetalle mit starken Umwelt- und Gesundheitsbelastungen verbunden. Außerdem sind Reserven, Gewinnung und Raffination bei den meisten dieser Rohstoffe auf wenige Länder konzentriert. Daraus resultiert eine hohe Abhängigkeit der Hersteller von Umwelttechnologien vom globalen Rohstoffhandel, zumal der Markt für die meisten Technologiemetalle eher klein und wenig transparent ist.

Es ist derzeit absehbar, dass Effizienz- und Recyclingstrategien allein nicht ausreichen werden, um die vielschichtigen Versorgungsrisiken entscheidend zu mindern und einen tiefgreifenden Ausbau der Umwelttechnologien weltweit zu gewährleisten. Doch gerade die globale Übertragbarkeit der entwickelten Pfade zum Umbau der Energieversorgung und der Mobilitätswende ist eine wichtige Randbedingung für ein weitestgehend treibhausgasneutrales Deutschland 2050. Hierfür werden verstärkt Substitutionstechnologien zur Anwendung kommen müssen, um die entsprechenden Technologierohstoffe zu ersetzen: Sei es durch Materials substitution, bei der partiell Werkstoffe oder Elemente ersetzt werden, technologische Substitution, bei der neue Technologien und Verfahren eingesetzt werden um den gleichen Umweltnutzen zu erzielen oder auch durch funktionale Substitution, bei der ein gänzlich neues Produkt- oder Dienstleistungskonzept eingeführt wird.

Um die Substitutionspotenziale zu bestimmen und systematisch zu erschließen, hat das UBA eine Roadmap erarbeiten lassen. Mit dieser Roadmap werden je nach Reifegrad und Zeithorizont der Substitutionsalternativen Anreize für Maßnahmen zur Technologieentwicklung, Markteinführung, Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch sowie Anpassung der rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen gegeben (Buchert et al., 2019). Dabei wurden 40 Technologien über alle 6 Umwelttechnologieleitmärkte des BMU identifiziert, die weltweit eine hohe Wachstumsdynamik aufweisen und gleichzeitig eine außerordentliche Umweltrelevanz haben (siehe Tabelle 6-6).

**Tabelle 6-6: Besonders relevante Technologien nach Umwelttechnologieleitmärkten**

Energie- erzeugung	Energie- effizienz	Rohstoff- effizienz	Mobilität	Kreislauf- wirtschaft	Wasser- wirtschaft
Lithium-Ionen- Stromspeicher	Kompressoren	Aerogele	Pedelecs	Automatische Stofftrennverf ahren	Wassereffizienz- technologien
Concentrating Solar Power	RFID	Nanobe- schichtung von Oberflächen	Elektro- antriebs- motoren	Schlacken- und Klärschlamm- aufbereitung	Umkehrosmose (hochpermeable Membranen)
High temperature superconducting (HTS)- Generatoren	Weißer Leuchtdioden (LED)	Bleifreie Lote	Karosserie	Phosphorrück- gewinnung	Dezentrale Wasser- aufbereitung
Reluktanz- Generatoren	Organische Leuchtdioden (OLED)	Industriekatal- ysatoren	Leichtbau (Titan und Scandium airframe)		
Gas-und-Dampf- Kraftwerke	Hochleistungs- Permanent- magnete in Industrieanwen- dungen	Celitement	Fahrzeug- Abgas- Katalysatoren		
Dünnschicht- Solarzellen	Grüne Rechenzentren	Precision Farming	Lithium-Ionen- Batterien für Fahrzeuge		
Tandemzellen	Membran- elektrolyse Chloralkali mit Sauerstoffverze- hrkathode		Hocheffiziente Flugzeugtrieb- werke		

Quelle: (Buchert et al., 2019)

Bei der Untersuchung der Substitutionsalternativen wurden vier Cluster deutlich:

- Umwelttechnologien, für die bereits heute Substitutionsalternativen auf den Markt vorhanden sind und kritische Metalle substituiert werden. Hierunter fallen bleifreie Lote, Fahrzeug-Abgas-Katalysatoren, Elektroantriebsmotoren in vollelektrischen Pkw, Hochleistungs-Permanentmagnete in der Industrie, Dünnschicht-Solarzellen, Tandemzellen, Concentrated Solar Power (CSP)-Technologie und Radio-frequency identification (RFID).
- Umwelttechnologien, die marktreife Alternativen besitzen mit deutlicher Reduzierung des Einsatzes der als kritisch identifizierten Metalle. Dazu zählen die Umwelttechnologien der Pedelec-Batterien, Hybridmotoren, Elektroantriebsmotoren der Plug-in-Hybrid-Pkw (PHEV), Lithium-Ionen-Stromspeicher und Lithium-Ionen-Batterien für Fahrzeuge.

- Umwelttechnologien, die Substitutionsoptionen besitzen, welche noch nicht im Markt etabliert sind, aber großes Potential für eine absehbare Marktreife besitzen. Diese Technologien sind ökonomisch noch nicht wettbewerbsfähig oder die Entwicklung ist noch nicht vollständig ausgereift. Darunter fallen weiße OLED anstelle von weißen LED sowie Permanentmagnet-Generatoren für Windkraftanlagen.
- Umwelttechnologien, für die keine Substitutionsmöglichkeiten im Rahmen des Projektes identifiziert werden konnten. Dazu zählen grüne Rechenzentren, Industriekatalysatoren, Pedelec-Motoren, Synchron- und Asynchron-Generatoren in Windkraftanlagen sowie GuD/Gas - Kraftwerke.

Über alle Umwelttechnologien zeigt sich, dass Substitutionsalternativen deutliche Rohstoffeinsparungen von relevanten Materialien ermöglichen. Hohe Einsparpotenziale sind bei Silber, Gold, Palladium, Seltenen Erden, Lithium, Zinn, Gallium, Titandioxid, Mangan und Platin identifiziert. Beispielsweise liegt das Einsparpotential für die nur im Umfang von wenigen Tausend Tonnen pro Jahr produzierten Schweren Seltenen Erde Dysprosium 2025 bereits bei 33 % bzw. knapp 1.300 Tonnen. Dabei können die größten Einsparungen durch technologische Substitutionen bei den Elektroantriebsmotoren und bei den Hybridmotoren erzielt werden. Im Jahr 2050 liegt das Einsparpotential im Substitutionsszenario sogar bei 66 % bzw. 13.300 Tonnen. Allerdings zeigte die Analyse auch auf, dass bei den Substitutionen nicht alle derzeit kritischen Rohstoffe ersetzt werden können und die Einsparung teilweise mit dem Einsatz anderer, ebenfalls kritischer Rohstoffe einhergeht (vgl. (Graedel et al., 2015; Graedel et al., 2013)). In Einzelfällen wie bei Platin kommt es auch im Substitutionsszenario unter Berücksichtigung der Elektromobilität bis 2050 zu einer Zunahme des Rohstoffbedarfs.

Die Substitutionsroadmap (Marscheider-Weidemann et al., 2016) zeigt auf, dass es in den industriepolitisch-strategischen, wachstumsstarken Technologiefeldern: Elektronik, Katalysatoren, Permanentmagnete, Solartechnologie, Speichertechnologien, Generatoren und Permanentmagnete weltweit eine beachtliche Dynamik durch Substitutionstechnologien in den kommenden Jahrzehnten geben kann. In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass Themen von hoher industriepolitischer Bedeutung autonom hinsichtlich Effizienzsteigerungen und Substitutionsmöglichkeiten angetrieben werden, so z. B. beim Seltenerd-Permanentmagnetmotor für die Elektromobilität. Bei anderen Technologiefeldern sind die Substitutionsoptionen bislang weniger im Fokus und daher kaum ausgereift. Während Effizienzgewinne auf Erfahrungswerten basieren, haben Substitutionen das Potenzial disruptiv Märkte zu verändern.

Auch wenn die zahlreichen in den Green-Szenarien berücksichtigten Umwelttechnologien aus heutiger Sicht konsistent für Deutschland sind, so könnte ihr tatsächlicher weltweiter Ausbau sich unter Berücksichtigung von Substitutionstechnologien, die heutzutage noch nicht marktreif sind, oder die sich noch gar nicht abzeichnen, deutlich anders gestalten. Folglich sind auch die extrapolierten Bedarfe 2050 für einzelne Rohstoffe im Gegensatz zu den Materialklassen und -kategorien mit wesentlich größeren Unsicherheiten behaftet. Sie können jedoch dazu beitragen, Problemlagen hoher Rohstoffkritikalität frühzeitig aufzuzeigen.

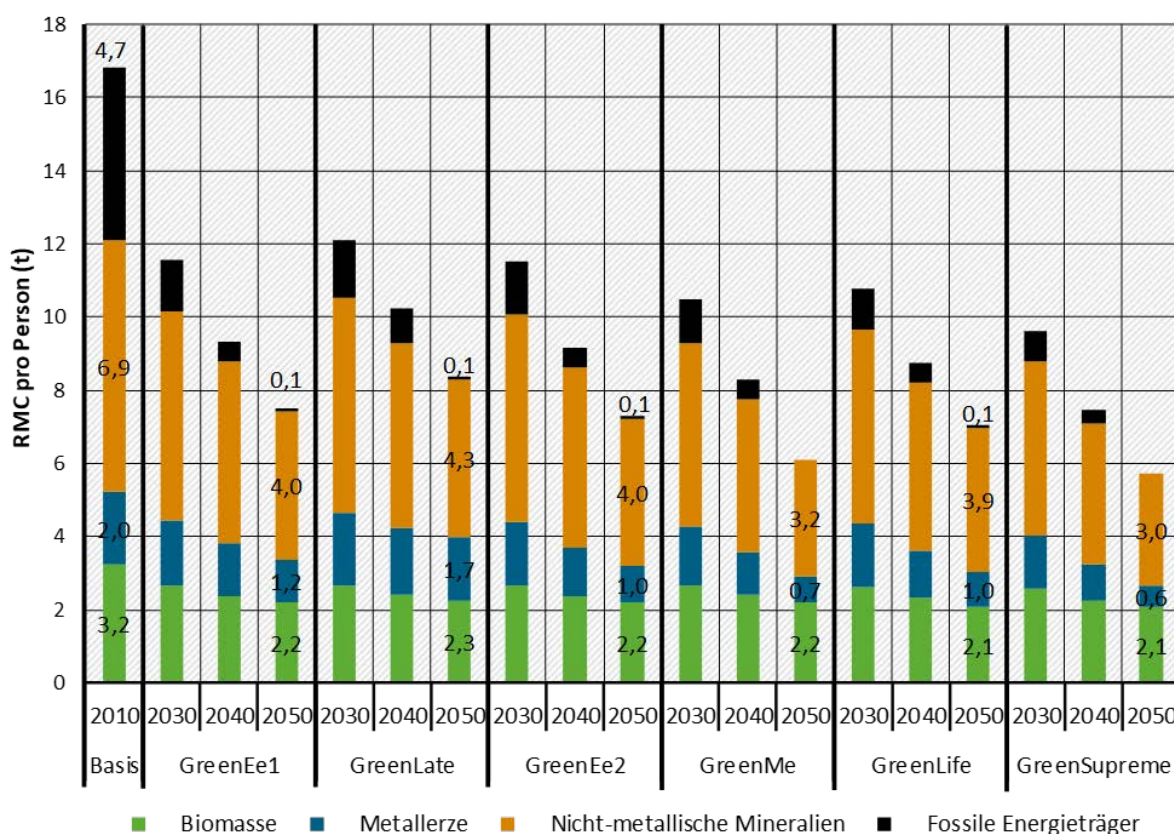
#### 6.2.4 Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Kopf

Der Primärrohstoffkonsum (RMC) im Jahr 2010 betrug in Deutschland 16,8 t pro Person (Abbildung 6-24) und lag damit über dem globalen Durchschnitt von 11,1 t pro Person nach Berechnungen des UNEP Ressourcenrats (UNEP, 2019b). In den Green-Szenarien wird eine Reduktion des RMC auf 5,7 (GreenSupreme) bis 8,4 t pro Person (GreenLate) im Jahr 2050



erreicht. Alle Szenarien, bis auf GreenLate, erreichen somit in 2050 den in der Literatur diskutierten Korridor einer nachhaltigen Rohstoffinanspruchnahme von 5 bis 8 t pro Kopf und Jahr (Bringezu, 2015; IRP, 2014; Lehmann (Ed.), 2018; UNEP, 2011). Einen RMC um die 6 t pro Kopf hatten in 2015 Länder wie z. B. Laos, die Dominikanische Republik, El Salvador, Tunesien und Usbekistan (UNEP, 2019b). Der Vergleich zeigt, dass ein vergleichsweise geringer Primärrohstoffkonsum in Deutschland in 2050 auf einem hohen technologischen und Wohlstands-Niveau möglich sein kann.

**Abbildung 6-24: Rohstoffinanspruchnahme pro Person (RMC/Kopf) im Zeitraum 2010 bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Es wird in Abbildung 6-24 deutlich, dass bei einer Pro-Kopf-Betrachtung der Rohstoffinanspruchnahme der Konsum von Produkten auf Basis von Biomasse in 2050 kaum variiert zwischen den Szenarien. Dieser Anteil wird wesentlich durch Nahrungsmittel und deren Produktion geprägt. In GreenLife und GreenSupreme reduzieren sich der Fleischkonsum und damit auch der Futtermittelbedarf nochmals, was sich im Biomassebedarf niederschlägt. Der erhöhte Holzbedarf im Bausektor in GreenMe und GreenSupreme hingegen ist nicht so deutlich aufgrund des geringen Neubaubedarfs in 2050 sowie weiteren Faktoren, wie die unterstellten Einsparungen bei Verpackungen (Papier und Kartonagen), siehe Kapitel 5.5.9.

Die Unterschiede im Bedarf an metallischen Mineralien spiegeln im Wesentlichen die unterschiedlichen Materialeffizienzen (z. B. GreenMe im Vergleich zu GreenLate), die Annahme zur technologischen Entwicklung außerhalb Europas (GreenMe/GreenSupreme im Vergleich zu den weiteren Szenarien) sowie die ausgeglichene Handelsbilanz (GreenEe1 zu GreenEe2) wider.

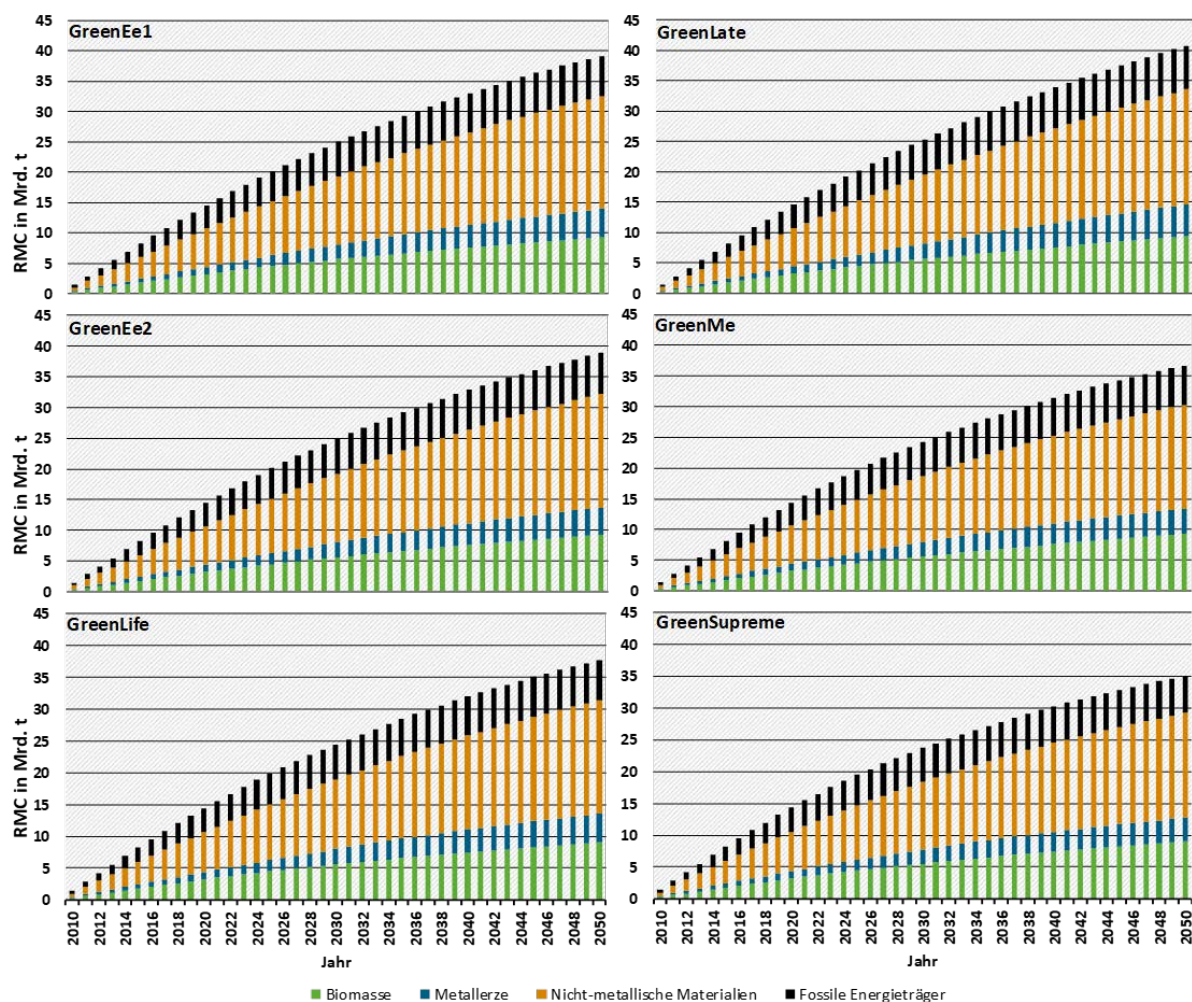
Auffällig ist der im Vergleich zu GreenMe deutlich höhere pro-Kopf-Bedarf an Mineralien in GreenLife. Neben den szenariospezifischen Annahmen zum Sekundärrohstoffeinsatz, zur

Materialsubstitution und der Materialeffizienzsteigerung, insbesondere im Bausektor (vgl. Kapitel 5.3.5) und den Anlagen des Energiesystems, wirkt sich wahrscheinlich der höhere inländische Ausbau an Photovoltaikanlagen im GreenLife-Szenario verglichen mit GreenMe hier aus. Auch die Annahme, dass der Rest der Welt sich im GreenLife-Szenario mit einem 10-Jahreszeitverzug entwickelt, wohingegen im GreenMe-Szenario eine zeitgleiche Umstellung angenommen wird, führt zu höheren Bedarfen an metallischen und nicht-metallischen Mineralien.

### 6.2.5 Kumulierter RMC Vergleich

Der kumulierte Rohstoffkonsum im Zeitraum 2010 bis 2050 ist in Abbildung 6-25 dargestellt und bewegt sich zwischen 35, Mrd. t in GreenSupreme und 40,8 Mrd. t in GreenLate bis zum Jahr 2050.

**Abbildung 6-25: Kumulierter RMC im Zeitraum 2010 - 2050 im Vergleich für die sechs Green-Szenarien**



Hinweis: Zwischen den Jahren 2010, 2030, 2040 und 2050 wurde linear interpoliert.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Dabei werden bei einer vollständigen Umstellung auf erneuerbare Energien bis 2050 noch 5,9 Mrd. t bis 7,2 Mrd. t fossile Rohstoffe von der deutschen Volkswirtschaft direkt oder indirekt benötigt mit Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen (siehe Kapitel 6.1). In allen Green-Szenarien findet noch ein Anstieg des kumulierten RMC fossiler Rohstoffe beginnend mit dem

Ausgangsjahr 2010 auf 5,3 bis 5,8 Mrd. t in 2030 statt. In den Folgejahren reduziert sich der Konsum fossiler Rohstoffe deutlich, sodass der jährliche Anstieg je nach Szenario ab 2028 (GreenMe, GreenLife, GreenSupreme), 2029 (GreenEe1 und GreenEe2) oder 2030 (GreenLate) nur noch 2 % pro Jahr beträgt und im Zeitverlauf weiter absinkt. In den Szenarien GreenMe und GreenSupreme findet ab 2049 kein Verbrauch fossiler Rohstoffe inklusive der importierten Güter mehr statt. In den anderen Szenarien findet auch in den letzten Jahren noch eine geringe Zunahme des RMCs fossiler Rohstoffe statt (ca. 5 bis 8 Mio. t von 2049 bis 2050). Wie bereits im Kapitel 6.2.1 erläutert, ist dies verbunden mit der Szenarioannahme einer verzögerten Umstellung auf erneuerbare Energien im Rest der Welt (10-Jahres Zeitverzug), wodurch weiterhin fossile Rohstoffe z. B. bei der Herstellung von Gütern im Ausland eingesetzt, und durch Importe dem Konsum in Deutschland zugerechnet werden. In den Szenarien GreenMe und GreenSupreme wird bis 2050 global ein zeitgleicher Ausstieg aus den fossilen Rohstoffen angenommen, wodurch der RMC 2050 keine fossilen Rohstoffe mehr enthält.

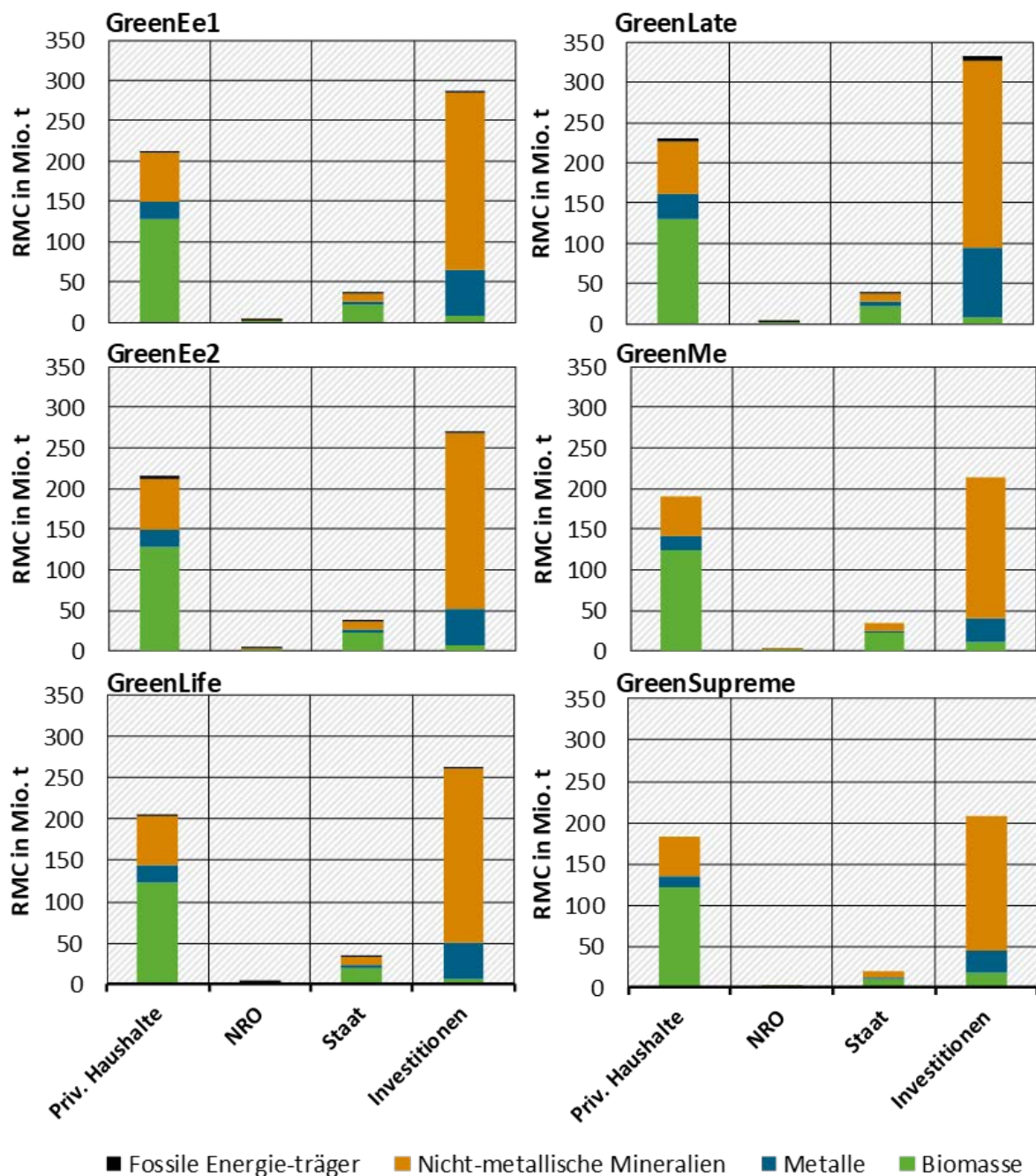
Zusätzlich werden für die in den Szenarien skizzierte Transformation bis 2050 rund 16,4 bis 19,0 Mrd. t nicht-metallische Mineralien (z. B. für Infrastruktur sowie den Aufbau des erneuerbare Energiesystems), 3,8 bis 5,3 Mrd. t Metallerze (z. B. zur Nutzung in Gebäuden und Infrastruktur, Elektromobilität, dem Energiesystem etc.) und 9,0 bis 9,3 Mrd. t Biomasse (Nahrungs- und Futtermittel, Holz für Gebäude, etc.) benötigt.

Im Vergleich dazu betrug die globale Rohstoffextraktion in 2017 ca. 92 Mrd. t (UNEP, 2019b). Davon betrug der RMC von China im Jahr 2017 allein rund 29,4 Mrd. t Deutschlands Bedarf nach Rohstoffen bis 2050 entspricht also ca. 38 % bis 44 % der jährlichen globalen Extraktion im Jahr 2017. Im Vergleich zum RMC Chinas in 2017 liegt der kumulierte Rohstoffkonsum Deutschlands verbunden mit den hier skizzierten Transformationspfaden bis 2050 bei rund 70 % bis 80 %.

### **6.2.6 Bedürfnisfelder im Vergleich**

Der Konsum von Primärrohstoffen nach Kategorien der letzten Verwendung (private Haushalte, Nichtregierungsorganisationen (NRO), Staat und Investitionen) ist in Abbildung 6-26 dargestellt.



**Abbildung 6-26: RMC nach Kategorien der letzten Verwendung in 2050**

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Investitionen wie z. B. Gebäude, (Produktions-)Ausrüstung und Anlagen etc. machen den größten Teil des Rohstoffkonsums in 2050 aus. Während 2010 der Anteil der Investitionen mit 44 % der letzten inländischen Verwendung noch geringer war als der Anteil des Konsums, kehrt sich dieses Verhältnis in allen Szenarien um. Dies lässt sich zu großen Teilen auf die Umstellung der Energieversorgung und dem damit reduzierten Bedarf an fossilen Rohstoffen erklären. Während 2010 der Anteil fossiler Energieträger am Primärrohstoffbedarf des Konsums bei rund 41 % lag, betrug deren Anteil am Primärrohstoffbedarf der Investitionen lediglich circa 11 % (Dittrich et al., 2018). Insgesamt führen die Investitionen in 2050 zu einem Großteil der Nachfrage nach nicht-metallischen Mineralien. Hierbei zeigt erneut der Vergleich von GreenLate und GreenMe mit den beiden GreenEe-Szenarien die Effekte der Annahmen zu Materialeffizienz,

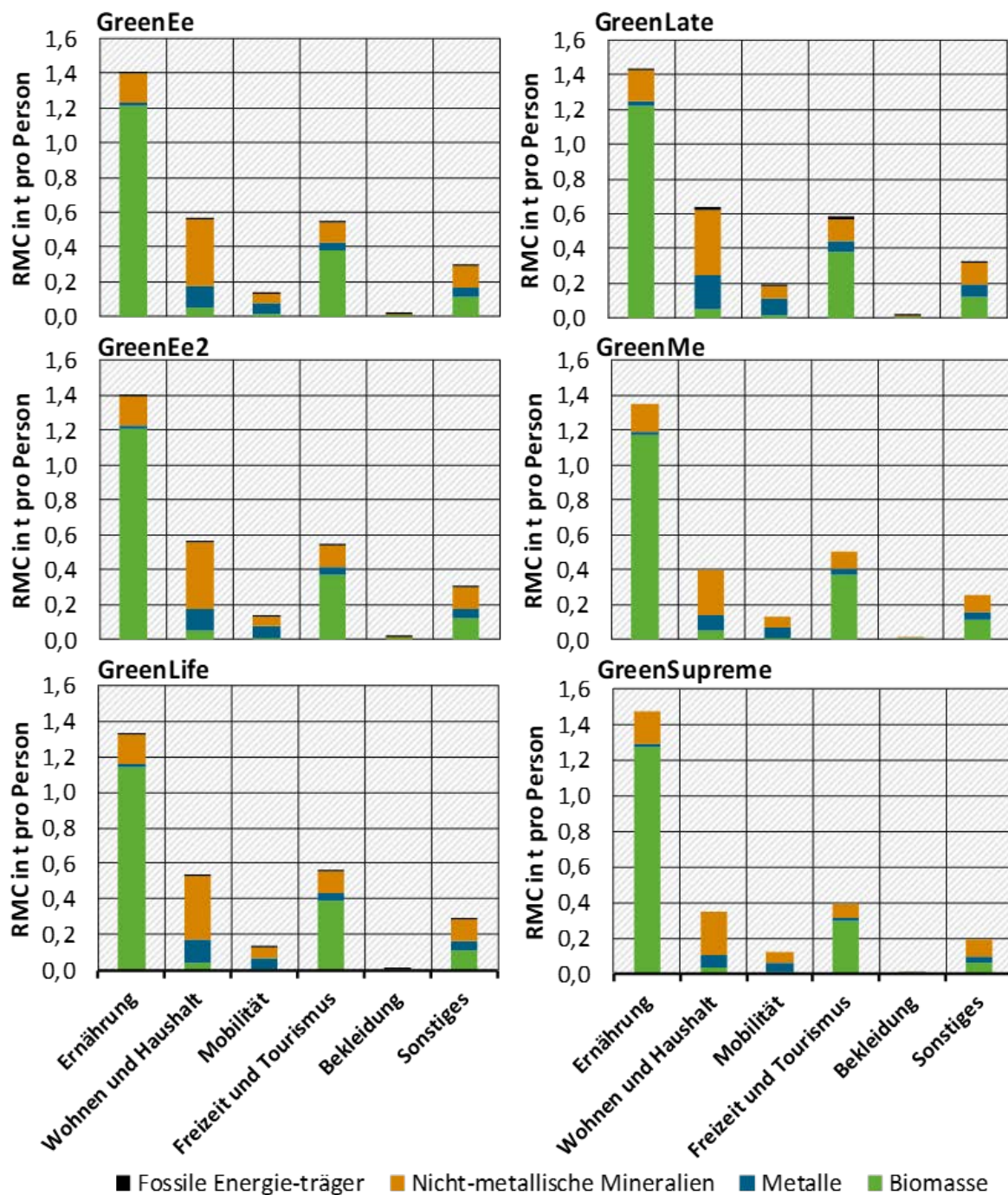


Substitution und Sekundärrohstoffanteilen entsprechend der Szenariocharakteristika, insbesondere im Bedarf an metallischen und nicht-metallischen Mineralien.

Die Konsumausgaben des Staates (Gesundheitspflege, Dienstleistungen des Staates wie Schule, Verteidigung oder Verwaltung und die Sachleistungen der Sozialleistungen.) und NROs machen im Vergleich einen wesentlich kleineren Teil des Gesamt-RMC aus und werden durch den Konsum von Biomasse dominiert. Dies spiegelt zum einen wider, dass öffentliche Neubauten und Infrastrukturprojekte den Investitionen zu zurechnen sind und somit nur ein geringer Bedarf an metallischen und nicht-metallischen Mineralien besteht. Dieser reduziert sich gegenüber 2010 in allen Szenarien deutlich (Dittrich et al., 2018). Zum anderen führt der Verzicht auf fossile Energieträger zur Dominanz des Biomassekonsums, also insbesondere der Bedarfe an Nahrungsmitteln und deren Produktionsaufwendungen. Dieser liegt mit Ausnahme von GreenSupreme in allen Szenarien über dem Biomassekonsum des Staates in 2010 (Dittrich et al., 2018). Hier scheint die für GreenSupreme unterstellte Wachstumsbefreiung einen wesentlichen Erklärungsansatz zu liefern. So wird sowohl in GreenLife und GreenSupreme ein verstärkt vegetarisches Essensangebot in den öffentlichen Kantinen (z. B. Krankenhäusern, Schulen, Kindergärten, Behörden) und als auch ein deutlich reduzierter Papierbedarf der öffentlichen Verwaltungen unterstellt. Dies führt zu einer Reduktion des Biomassekonsums des Staates in beiden Szenarien. Während aber in GreenLife noch ein weiteres Wachstum auch des Dienstleistungssektors, zu dem in weiten Teilen auch die Aktivitäten des Staates zählen, unterstellt wird, greift in GreenSupreme in diesem Sektor die unterstellte Wachstumsbefreiung. Gleichzeitig berücksichtigt GreenSupreme analog zu GreenMe rohstoffeffizientere Produkte auf Basis von Biomasse. Dies führt zu einer weiteren Reduktion des Biomassekonsums im Vergleich zu GreenLife.

Der RMC für Investitionen ist dicht gefolgt von dem Rohstoffkonsum der privaten Haushalte, welcher in (Abbildung 6-27) im Detail dargestellt ist.

**Abbildung 6-27: RMC des privaten Konsums im Jahr 2050 und aufgegliedert nach Bedürfnisfeldern für die sechs Green-Szenarien**



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

Der RMC für private Haushalte ist geprägt von einem hohen Konsum von Biomasse, auch hier wieder insbesondere durch den Konsum von Nahrungsmitteln, als auch nicht-metallischen Mineralien. Die Ernährung ist mit rund 1,3 bis 1,4 t pro Person der größte Posten und setzt sich zusammen aus Biomasse für Nahrungsmittel (ca. 85 %) und einem kleinen Anteil an nicht-metallischen Mineralien und Metallen bspw. für die mit der Nahrungsmittelproduktion verbundene Düngemittel, Salze bzw. Chemikalien (z. B. zur Verarbeitung und Haltbarmachung der Nahrungsmittel) (ca. 15 %). Während 2010 das Bedürfnisfeld Ernährung mit 2,47 t pro Person rund 29 % des Konsums privater Haushalte betrug (Dittrich et al., 2018), steigt

der Anteil in 2050 auf 45 % (GreenLate) bis 58 % (GreenSupreme)<sup>160</sup>. Auch hier zeigt sich wieder der Verzicht auf fossile Energieträger, insbesondere in den Bedürfnisfeldern Mobilität und Wohnen, als ein wichtiger Aspekt zur Verschiebung der Anteile zwischen den unterschiedlichen Bedürfnisfeldern.

Der Rohstoffkonsum für Wohnen und Haushalt sowie Freizeit und Tourismus liegt mit 0,5 bis 0,6 t/Person nahe beieinander. Das Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalte reduziert sich dabei auf ein Fünftel des Wertes von 2010, hauptsächlich durch den Verzicht auf fossile Energieträger bei der Wärme- und Warmwasserversorgung. Während diese 2010 aufgrund des Energiebedarfs dominierend im Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt waren (Dittrich et al., 2018), steht 2050 in allen Szenarien der Bedarf an nicht-metallischen Mineralien und Metallen bspw. für Sanierungen und Reparaturen (Materialien für Gebäude finden sich in Investitionen) und zur Bereitstellung der benötigten Energie im Vordergrund. Das Bedürfnisfeld „Freizeit und Tourismus“ führt u. a. zur Nachfrage nach Nahrungsmitteln (Biomasse) in Hotels und Gaststätten. Hier erfolgt ein vergleichsweise geringer Rückgang von rund einem Drittel im Vergleich zu 2010, im Wesentlichen aufgrund des Verzichts auf fossile Energieträger und veränderter Ernährungsweisen, die sich auch in der Außer-Haus-Verpflegung widerspiegeln.

Während die für die Mobilität benötigte Verkehrsinfrastruktur im Wesentlichen als Investition bilanziert wird, spiegelt der Rohstoffkonsum in diesem Bedürfnisfeld die Verkehrswende wider. Durch die Umstellung auf Elektromobilität reduziert sich der Konsum in diesem Bereich des privaten Konsums um fast 0,9 t/Person im Vergleich zu 2010 (Dittrich et al., 2018). Auch die Zunahme des öffentlichen Personennahverkehrs wirkt reduzierend auf den Pro-Kopf-Konsum im Bereich der Mobilität.

## 6.2.7 Entwicklung der Rohstoffproduktivität bis 2050

Bei einer jährlichen Reduktion des Primärrohstoffeinsatzes (RMI) und gleichzeitig steigendem Wirtschaftswachstum ist eine absolute Entkopplung von wirtschaftlicher Entwicklung und Rohstoffnutzung möglich. In allen Szenarien sinken RMI und RMC im Zeitverlauf bis 2050 ab (Tabelle 6-7). Gleichzeitig führt ein kontinuierlich steigendes Wirtschaftswachstum um ca. 0,7 % jährlich (alle Szenarien bis auf GreenSupreme ab 2030) zu einer Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts und somit der Gesamtrohstoffproduktivität<sup>161</sup>. Mit einer jahresdurchschnittlichen Steigerung von 2,3 % bis 3 % über alle Szenarien hinweg, ist somit die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRess II (BMUB, 2016) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung, 2018a). Aber auch im GreenSupreme Szenario (letzte Zeilen in Tabelle 6-7), in welchem von 2020 bis 2030 das durchschnittliche Wirtschaftswachstum auf null abnimmt und ab 2030 eine Wachstumsbefreiung angenommen wird, steigt die (Gesamt-)Rohstoffproduktivität aufgrund des anhaltenden Rückgangs des Primärrohstoffeinsatzes auch im Zeitraum 2030 bis 2050 weiterhin im Jahresdurchschnitt um 2,6 % an.

<sup>160</sup> Aufgrund der veränderten Nachfrage der Außer-Haus-Ernährung in GreenSupreme verschiebt sich ein Teil des Biomassekonsums in diesem Szenario aus dem Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus in das Bedürfnisfeld Ernährung. Hierdurch weist GreenSupreme den höchsten Wert im Bedürfnisfeld Ernährung auf.

<sup>161</sup> Die Gesamtrohstoffproduktivität ist definiert als preisbereinigtes Bruttoinlandsprodukt zuzüglich der preisbereinigten Ausgaben für Importe (BIP+M) geteilt durch die Masse der inländischen genutzten Entnahme von Rohstoffen zuzüglich der Masse der Importe ausgedrückt in Rohstoffäquivalenten (RMI). Die Gesamtrohstoffproduktivität umfasst abiotische und biotische Rohstoffe. Sie dient als produktionsbezogener Indikator für die Rohstoffeffizienz der deutschen Volkswirtschaft.

**Tabelle 6-7: Komponenten der Rohstoffproduktivität und Gesamtrohstoffproduktivität 2010-2050 sowie historischer Trend 1994-2010, jahresdurchschnittliche Veränderung in %**

Szenario	Zeitraum	BIP/RMC	Gesamtrohstoff- prod. (LV/RMI)	BIP	RMI	RMC
<b>Historischer Trend</b>	1994-2000*	3,30	3,60	1,90	-0,50	-1,35
	2000-2010*	2,90	1,30	0,90	0,30	-1,98
<b>GreenEe1</b>	2010-2030	2,80	2,70	0,80	-1,88	-2,01
	2030-2040	3,00	2,70	0,70	-2,00	-2,28
	2040-2050	3,40	2,50	0,70	-1,81	-2,60
<b>GreenLate</b>	2010-2030	2,60	2,40	0,80	-1,60	-1,78
	2030-2040	2,60	2,10	0,70	-1,40	-1,88
	2040-2050	3,20	1,90	0,70	-1,20	-2,52
<b>GreenEe2</b>	2010-2030	2,90	2,80	0,80	-2,00	-2,03
	2030-2040	3,20	2,90	0,70	-2,10	-2,42
	2040-2050	3,50	2,70	0,70	-2,00	-2,78
<b>GreenMe</b>	2010-2030	3,30	3,10	0,80	-2,20	-2,49
	2030-2040	3,20	3,00	0,70	-2,30	-2,49
	2040-2050	4,30	3,80	0,70	-3,00	-3,53
<b>GreenLife</b>	2010-2030	3,20	3,10	0,80	-2,30	-2,34
	2030-2040	3,00	2,70	0,70	-2,00	-2,27
	2040-2050	3,40	2,60	0,70	-1,90	-2,70
<b>Green Supreme</b>	2010-2030	3,00	2,70	0,50	-2,70	-2,90
	2030-2040	2,70	2,10	0,00	-2,00	-2,66
	2040-2050	3,30	3,10	0,00	-3,00	-3,18

Hinweis: URMOD verkettet mit Eckwerten 2000 und 2010 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994 - 2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA), Zwischen den Stützjahren lineare Entwicklung unterstellt.

Quelle: (Dittrich et al., 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e)

### 6.2.8 Weitere Umweltwirkungen

In diesem Projekt wurden die inländischen Treibhausgasemissionen sowie Rohstoffinanspruchnahmen im In- und Ausland verbunden mit der Transformation hin zu einem ressourcenschonenden und weitestgehend treibhausgasneutralen Deutschland betrachtet. Die in den Green-Szenarien aufgezeigten Technologieentwicklungen und Lebensstiländerungen helfen zwar, bestehende negative Wirkungen auf die natürliche und soziale Umwelt zu senken, aber sie erzeugen ihrerseits auch neue. Ein einfaches Beispiel dafür ist die steigende Nachfrage nach Rohstoffen wie z. B. Kobalt und Lithium in der E-Mobilität, welche bislang nur in geringen Mengen genutzt werden, und damit einhergehenden Ressourcenaufwendungen (z. B. Wassernutzung und Flächeninanspruchnahme im Ausland) sowie Umweltwirkungen (z. B. Versauerung, Eutrophierung, etc.) und somit Wirkungen auf die menschliche Gesundheit und



Ökosysteme (UNEP, 2013). Die Rohstoffbereitstellung ist auch verbunden mit vielfältigen sozialen Auswirkungen bspw. mit Fragen der Rohstoffverteilung, dem sicheren Zugang zu Frischwasser oder der Ernährungssicherheit (Mancini et al., 2019).

Systematische Korrelationsanalysen zeigen, dass die Betrachtung von reinen Rohstoffmassen oder der rein massebasierten gesamtwirtschaftlichen Materialflussindikatoren wie der RMC oder der RMI nicht als repräsentative Ressourcenindikatoren qualifiziert sind. Sollen weitere Ressourceninanspruchnahmen und Umweltwirkungen der Rohstoffwirtschaft abgebildet werden, so müssen weitere Methoden angewandt und ergänzende Indikatoren betrachtet werden.

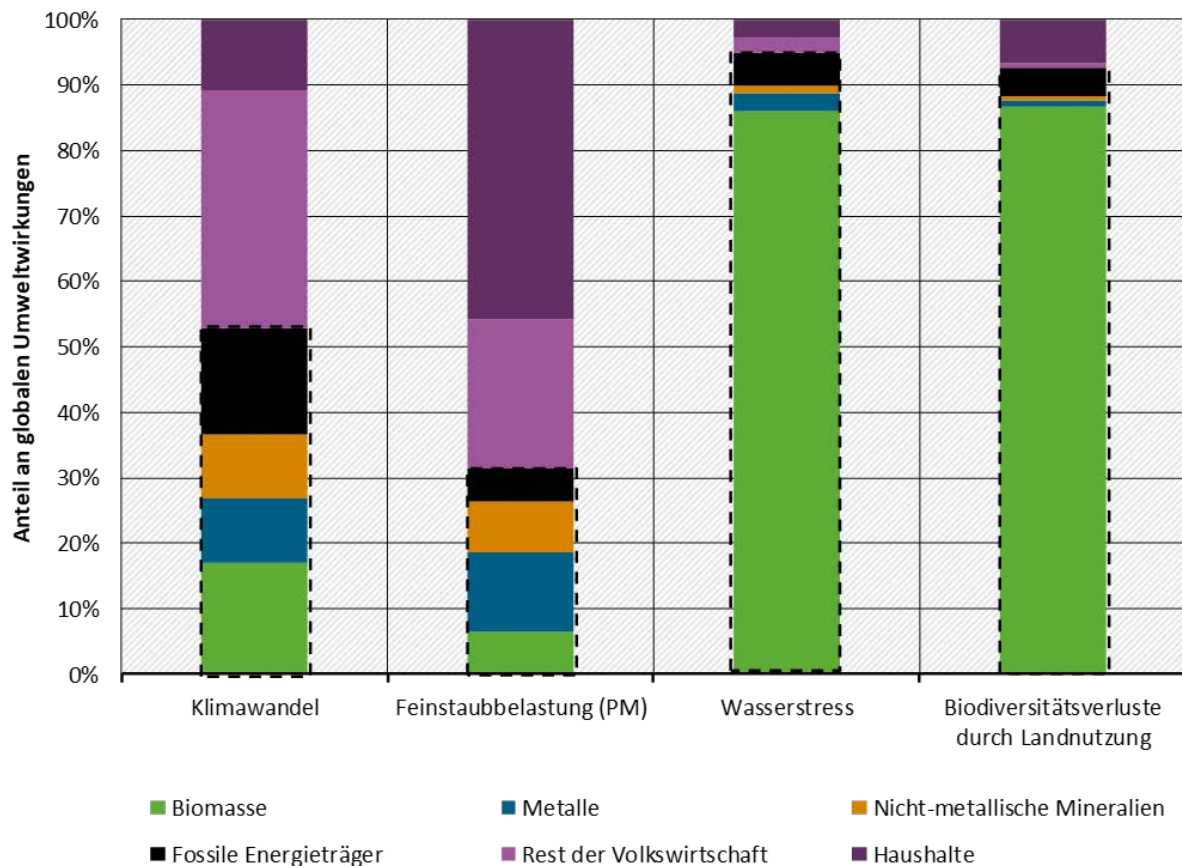
Eine vollständige Abschätzung und Bewertung der Auswirkungen auf Umwelt und Mensch verbunden mit den hier beschriebenen Transformationspfaden bis 2050 konnte in diesem Projekt nicht unternommen werden. Dies findet im Rahmen weiterer (laufender) Forschungsvorhaben am Umweltbundesamt statt. Aufgrund des Fokus auf Ressourcen- und Klimaschutz soll in diesem Kapitel aber ein knapper Überblick über weitere Umweltwirkungen verbunden mit der Rohstoffnachfrage erfolgen.

#### **6.2.8.1 Umweltwirkungen der Rohstoffproduktion**

Der Mensch greift beim Abbau von Rohstoffen vielfältig in Natur und Umwelt ein. Zu Beginn steht ein Projekt zur Förderung von Rohstoffen. Es beginnt mit der Erkundungsphase (Exploration) gefolgt von der Erschließungs- und Abbauphase bis hin zur Schließungs- und Nachsorgephase. Wesentliche Umweltwirkungen beziehen sich auf die Eingriffe in den Wasser- und Naturhaushalt und mögliche Auswirkungen auf Biodiversität, der Umgang mit Bergbauabfällen, der Energiebedarf in Form von Kraftstoffen, Strom und Wärme, sowie Emissionen von Treibhausgasen und Schadstoffen in Wasser, Boden und Luft. Die Bereitstellung von Primärrohstoffen beinhaltet die Entnahme aus der Natur, Aufbereitung zu Rohmaterialien und deren Veredelung sowie die anschließende Verarbeitung in Produkte und Güter zur weiteren Nutzung. Auch während der Nutzungsphase und am Lebensende eines Produkts können Umweltwirkungen auftreten z. B. wenn (dissipative) Verluste in die Umwelt stattfinden und durch die Energie- und Materialbedarfe für anschließendes Recycling und Abfallmanagement.

Der Ressourcenrat der Vereinten Nationen schätzt, dass die Extraktion und Weiterverarbeitung von Rohstoffen (Biomasse, Metalle, nicht-metallische Mineralien und Fossile Energieträger) zu ca. 50 % der globalen Treibhausgasemissionen und mehr als 90 % der Biodiversitätsverluste und des Wasserstresses beitragen, wie in Abbildung 6-28 zu sehen ist (UNEP, 2019a). Diese Abschätzung verdeutlicht, dass Ressourcenpolitik zentral für die Erreichung von Klima- und Biodiversitätszielen ist.

**Abbildung 6-28: Beitrag zu Umweltwirkungen aufgeteilt nach einzelnen Rohstoffkategorien (Extraktion und Weiterverarbeitung), der restlichen Volkswirtschaft und Haushalten**



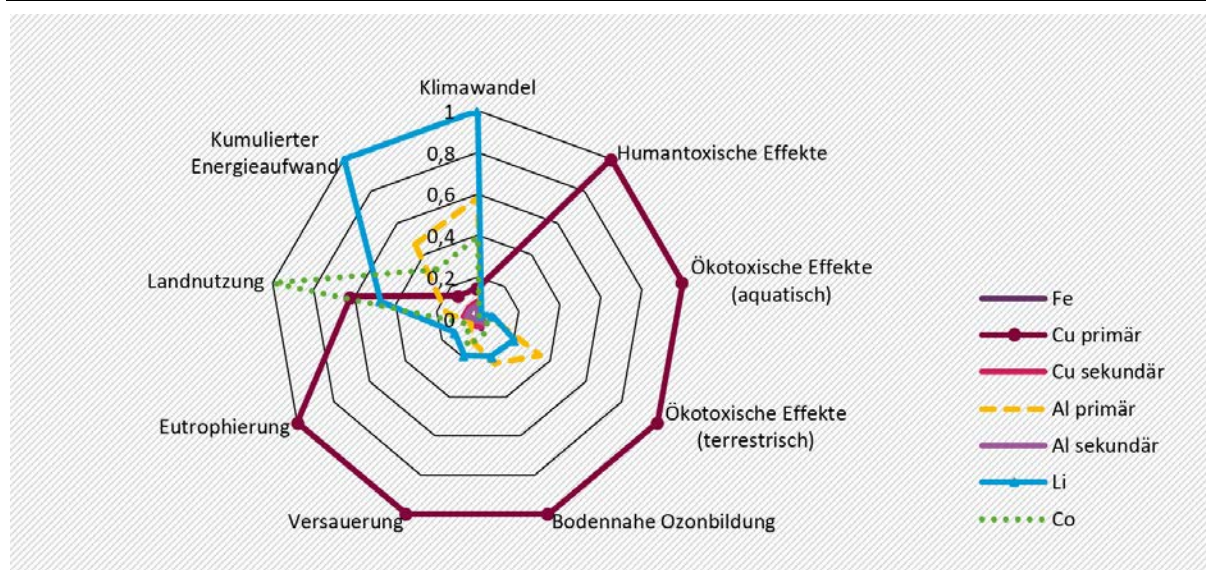
Hinweis: Referenzjahr 2011.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Daten von (UNEP, 2019a) (Datenquelle: Exiobase 3.4 (Stadler et al., 2018) kombiniert mit Landnutzungsdaten von (UNEP, 2019a)).

Die Green-Szenarien zeigen nun, dass es möglich ist, die Rohstoffinanspruchnahme und Treibhausgasemissionen im Zeitverlauf bis 2050 zu reduzieren. Gleichzeitig kann jedoch im Vergleich zu 2010 die Inanspruchnahme einzelner Rohstoffe wie Co und Li zwischenzeitlich ansteigen (Abbildung 6-20). Dies ist u. a. verbunden mit der zunehmenden Nutzung von Batterien im Verkehrsbereich. Auch 2050 werden weiterhin Primärrohstoffe nachgefragt, wenngleich insgesamt die Nachfrage wesentlich geringer ist, als im Ausgangsjahr 2010.

Am Beispiel von fünf Rohstoffen (Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Aluminium (Al), Lithium (Li) und Kobalt (Co)) werden in Abbildung 6-29 ausgewählte Umweltwirkungen von der Rohstoffentnahme bis zum Fabrikator („cradle-to-gate“) miteinander verglichen. Die Umweltwirkungen wurden mit der Methode der Ökobilanzierung abgebildet.

**Abbildung 6-29: Relativer Vergleich potenzieller Umweltwirkungen verbunden mit der Produktion von 1 kg Material am Fabrikator („cradle-to-gate“)**



Hinweis: Der Rohstoff mit dem höchsten Impact innerhalb einer Wirkungskategorie erhält den Wert „1“ und alle anderen Rohstoff-Impacts sind relativ dazu dargestellt.

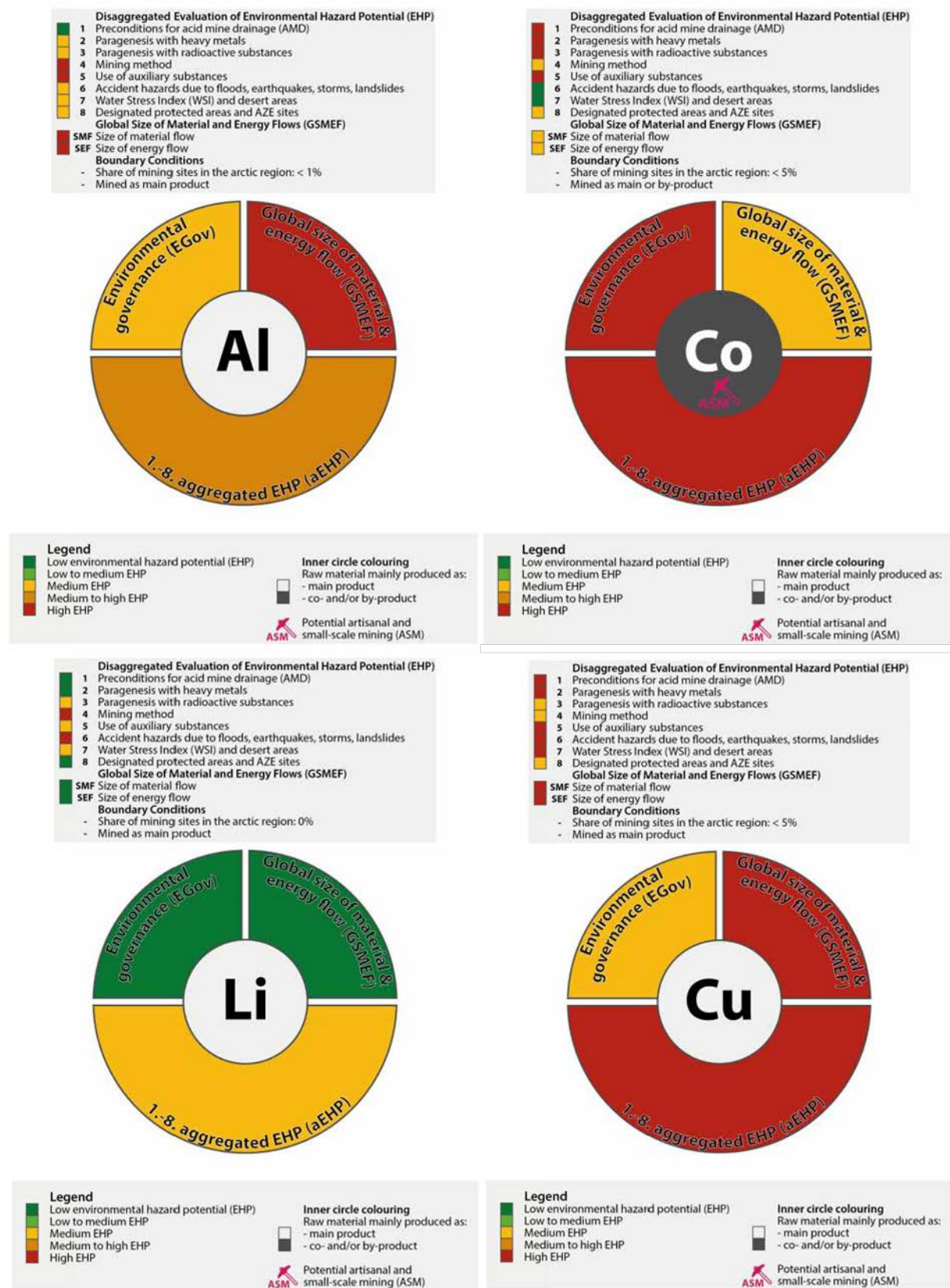
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von ecoinvent 2.2 Daten (ecoinvent, 2019) und der CML-IA baseline v3.03 Impact Assessment Methode (Universität Leiden, 2019)

Die Abbildung 6-29 zeigt, dass je nach Rohstoff unterschiedliche Umweltwirkungen relevant sein können. So findet die Herstellung von Primärkupfer hauptsächlich aus sulfidischen Kupfererzen (z. B. Kupferkies, Buntkupferkies) statt. Dabei können saure Grubenwässer (acid mine drainage) gebildet werden, welche zu Versauerung und möglichen toxischen Effekten für Natur und Menschen führen können. Im Vergleich dazu ist die Produktion einer äquivalenten Menge von Lithium mit höheren fossilen Energieaufwendungen und somit Treibhausgasemissionen verbunden (ca. 21 kg CO<sub>2</sub>Äq pro kg Lithium). Die Produktion von Kobalt ist hingegen mit einer höheren Flächeninanspruchnahme verbunden. Die Abbildung macht auch deutlich, dass die Nutzung von Sekundärrohstoffen (hier: Aluminium und Kupfer) im Vergleich zur Primärmaterialien mit geringeren Umweltwirkungen verbunden sein kann. An dieser Stelle soll auch angemerkt werden, dass aufgrund der unvollständigen Datenbasis in der Ökobilanzierung von Metallen (Nuss & Eckelman, 2014; UNEP, 2013), die Vergleiche in Abbildung 6-29 nur erste Abschätzungen erlauben und daher zukünftig mit detaillierteren Datenerhebungen und Studien verbunden werden sollten.

Neben den Betrachtungen mittels Ökobilanzierung gibt es weitere Ansätze für eine rohstoffbezogene Bewertung von Umweltgefährdungspotenzialen der bergbaulichen Rohstoffgewinnung. So führt das Umweltbundesamt im Projekt OekoRes II ein Screening der Umweltgefährdungspotenziale von 57 Rohstoffen mit einer eigens entwickelten qualitativen Bewertungsmethode durch (UBA, 2015c). Hierbei werden geologische, technische und standortbedingte Faktoren der Umweltgefährdung durch Bergbau auf einer dreistufigen Skala bewertet. Diese auf acht Indikatoren basierende Bewertung wird für jeden Rohstoff auch aggregiert auf einer fünfstufigen Skala dargestellt und durch Indikatoren zur Umweltgovernance in den Förderländern sowie der Größenordnung der globalen Energie- und Materialströme ergänzt. Zusätzlich werden in Fact-Sheets weitere umweltrelevante Informationen bereitgestellt (UBA, 2019g), etwa zur Relevanz von Kleinbergbau. In Abbildung 6-30 sind Ausschnitte aus vier Factsheets des OekoRes II Projekts für Aluminium, Kobalt, Lithium und Kupfer dargestellt.



**Abbildung 6-30: Übersicht über potenzielle Umweltgefährdungen bei der bergbaulichen Gewinnung von Rohstoffen nach dem ÖkoRes Project**



Hinweis: Umweltgefährdungspotenziale sind mit einer Farbskala hinterlegt: grün: Potenzial gering, gelb: mittel, rot: hoch sowie zusätzlich hellgrün: niedrig bis mittel und orange: mittel-hoch beim aggregierten Umweltgefährdungspotenzial.  
Quelle: (Dehoust, 2019)



Aus den Factsheets ist u. a. ersichtlich, dass Kobalt und Kupfer in der Regel aus sulfidischen Erzen gewonnen werden, was auf mögliche Umweltbelastungen durch saure Grubenwässer hindeutet („preconditions for acid mine drainage“). Ein Teil des Kobalts wird nicht industriell, sondern im Kleinbergbau gefördert, der Umweltschutzanforderungen mangels effektiver Regulierung in der Regel nicht umsetzt. Aluminium und Lithium erhalten ein hohes Gefährdungspotenzial bezüglich der Art der Abbauweise, da Bauxite und Lithium an bzw. nahe der Oberfläche aus losen Gesteinsschichten bzw. Salzseen abgebaut werden. Weitere Aspekte wie der Bergbau in geschützten Gebieten, Wasserstress oder die Verwendung von Hilfsstoffen und Chemikalien werden analysiert. Insgesamt erhalten Kobalt und Kupfer ein hohes aggregiertes Umweltgefährdungspotenzial (aEHP). Auch der Environmental Performance Index (EPI) der Förderländer als ein Indikator für die ökologische Leistungsbilanz von Staaten und Unternehmen wird mit den Produktionsmengen der einzelnen Rohstoffe gewichtet berücksichtigt „Environmental Governance“ (EGov). Die niedrige EGov-Punktzahl für Kobalt ist ein Anzeichen für eine schwache Implementierung von Umweltschutzanforderungen in den Hauptförderländern wie z. B. in diesem Falle der Demokratischen Republik Kongo. Mengenmäßig sind die durch den Abbau und die Verhüttung von Kupfer und Aluminium verursachten Material- und fossilen Energieströme vergleichsweise am höchsten (s. den Indikator „Global size of material and energy flows“ (GSMEF) in Abbildung 6-30).

Im Projekt ÖkoRess III wird für die weltweit 100 bedeutendsten Bergwerksstandorte der Rohstoffe Kupfer, Eisen und Bauxit eine detailliertere standortbezogene Abschätzung der Umweltgefährdungspotenziale mit einer angepassten Bewertungsmethodik durchgeführt. Die Ergebnisse werden zukünftig zusammen mit Kontextinformationen zur Governance in den Produktionsländern und zu Maßnahmen im Rahmen der gesellschaftlichen Unternehmensverantwortung als Factsheets auf einer interaktiven Online-Karte bereitgestellt.

### **Zukünftige Veränderungen der Umweltwirkungen**

Umweltwirkungen verbunden mit der Bereitstellung von Materialien in der Zukunft sind stark abhängig von Entwicklungen des Energiemix, Veränderung der Erzgehalte, Effizienz der Produktionsprozesse sowie der Anteil von Sekundärrohstoffen am Materialinput. Unter der Szenarioannahme, dass eine globale Transformation hin zu erneuerbaren Energien (Kraft- und Brennstoffe, Strom und Wärme) um die Mitte des Jahrhunderts abgeschlossen sein wird, reduzieren sich die energiebedingten Umweltwirkungen auch des Rohstoffabbaus. Jedoch zeichnet sich weltweit ab, dass die Erzgehalte der geförderten Erze bei einigen Metallerzen, z. B. Kupfer tendenziell abnehmen. Dieser Trend resultiert in steigenden Bergbauabfallmengen (Tailings) und immer größeren Absetzbecken (Tailing Management Facilities), die bei Störfällen in regelmäßigen Abständen zu Umweltkatastrophen führen, zuletzt 2015 und 2019 in Brasilien (Bowker et al., 2019; Santamarina et al., 2019). Bowker und Chambers kommen auf Basis von Regressionsanalysen zu dem Schluss, dass die Zunahme schwerer Störfälle in den letzten Jahrzehnten in direktem Zusammenhang mit dem Trend zur Förderung niedrigerer Erzgehalte steht (Bowker & Chambers, 2017). Darüber hinaus erfordern geringere Erzgehalte einen höheren Ressourcenaufwand bei der Erzaufbereitung (Wasser, Energie, Chemikalien). Die technologische Entwicklung hat bislang zu Produktivitätssteigerungen geführt, so dass auch Rohstoffe bei geringerem Erzgehalt gewinnbringend abgebaut werden und Energiemehraufwendungen teilweise sogar überkompensiert werden konnten (Rötzer & Schmidt, 2018). Die möglichen Auswirkungen, falls die technologische Entwicklung nicht Schritt halten kann, wurden im Projekt nicht weiter berücksichtigt. Erste Szenarien unter Annahme sich verändernder Erzgehalte sind z. B. von (Van der Voet et al., 2019) veröffentlicht worden und werden auch in Studien der OECD verwendet (OECD, 2019).

### 6.2.8.2 Ökonomische und soziale Wirkungen der Rohstoffproduktion

Die Rohstoffgewinnung im Bergbau hat signifikante Wirkungen auf das Wohlergehen von Menschen und Gesellschaften in den Förderregionen, positive wie negative, die jedoch häufig ungleich verteilt sind (Hodge, 2011). Diejenigen, die unter den negativen Auswirkungen Effekten des Bergbaus leiden, profitieren häufig nicht oder nicht ausreichend von den positiven Effekten (World Bank, 2004). Gesamtwirtschaftlich hat der Bergbau in den meisten Entwicklungs- und Schwellenländern zwischen 1996 und 2006 unter dem Strich positive sozio-ökonomische Effekte erzeugt (Ericsson & Löf, 2019). Afrikanische Länder mit Erzbergbau haben sich nach Ericssons Analyse verschiedener Wohlstands, Governance- und Entwicklungsindizes meist besser entwickelt als ölproduzierende Länder oder Länder ohne Bergbau – entgegen des viel diskutierten Phänomens des sogenannten Ressourcenfluchs (Glada & Paul, 2018).

Auf der anderen Seite kommt es im Bergbausektor wiederholt zu Menschenrechtsverletzungen. Während es im industriellen Bergbau dabei meist um Landnutzungsfragen, Rechte Indigener oder Umweltschutzfragen (Bergbauabfallmanagement, Wassernutzung) geht, sind es im Kleinbergbau neben Umweltfragen (Chemikalien, keine geordnete Schließung und Nachsorge) insbesondere schlechte Arbeitsbedingungen und Kinderarbeit. Konfliktbedingte Menschenrechtsverletzungen gibt es sowohl im industriellen als auch im Kleinbergbau: Während es im industriellen Bergbau meist gewaltsame Proteste gegen neue Bergbauprojekte sind, geht es im Kleinbergbau um Konflikte um die Bodenschätze oder um die Finanzierung bewaffneter Konflikte (Spohr, 2016).

Lokale und regionale sozio-ökologische Konflikte entzündeten sich, wenn die Umweltauswirkungen des Bergbaus Einkommens- und Versorgungsmöglichkeiten (Landwirtschaft, Fischerei) der lokalen Bevölkerung einschränken (Rüttinger & Scholl, 2017). Statistische Auswertungen für die Länder der Andenregion zeigen, dass die Zunahme der Bergbauproduktion zwischen 1970 und 2013 mit einer Zunahme sozio-ökologischer Konflikte einhergegangen ist (Pérez-Rincón et al., 2018).

Die sogenannten Konfliktrohstoffregulierungen in der EU und den USA zielen darauf ab, die Finanzierung bewaffneter Konflikte durch den Bergbau zu unterbinden, indem Rohstoffimporteure dazu verpflichtet werden nachzuweisen, dass sie und ihre Lieferanten mit „gebotener Sorgfalt“ (due diligence) handeln. Darüber hinaus gibt es eine zunehmende Zahl freiwilliger Initiativen, die wesentlich umfassendere soziale und ökologische Standards für den Bergbau definiert haben (z. B. die Initiative for Responsible Mining Assurance, (IRMA, 2019)) und die Einhaltung dieser Standards über Zertifizierungsmechanismen bis hin zum Endprodukt transparent ausweisen (CTN 59 (Kickler et al., 2018), IISD 2018 (IGF, 2018)). Der Nachweis, dass Gesetze zu Sorgfaltspflichten in Lieferketten oder freiwillige CSR Standards dazu beitragen, die Situation für die Menschen in den Bergbauregionen zu verbessern, ist bislang allerdings noch nicht erbracht worden.

### 6.2.9 Schlussfolgerungen für die nationale Ressourcenpolitik

Deutschland kann seinen Rohstoffbedarf (RMC) durch eine Kombination von Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen, Lebensstiländerungen und dem Umbau zu einem erneuerbaren Energiesystem ohne fossile Rohstoffe bis 2050 um bis zu 70 % reduzieren. Dies entspricht einem Konsum von Rohstoffen von 5,7 t RMC pro Kopf in 2050. Während die Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, innerhalb des aktuell diskutierten Korridors einer umweltgerechten Rohstofffinanzierung liegen, zeigt die Betrachtung von für die Transformation relevanten Einzelrohstoffen, dass lediglich GreenSupreme langfristig die Chance einer global gerechten Rohstoffnutzung aufweist. Mit einer jahresdurchschnittlichen Steigerung

von 2,3 % bis 3,0 % der Gesamtrohstoffproduktivität über alle Szenarien hinweg, ist die Entwicklung deutlich über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRess II (BMUB, 2016) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung, 2018a).

Dies zeigt somit, dass ambitionierter Klima- und Ressourcenschutz Hand-in-Hand gehen können und müssen. Um dies zu erreichen sind folgende Aspekte umzusetzen:

- ▶ Die aus Klimaschutzperspektive notwendigen technologischen Änderungen wie der Aufbau eines vollständigen erneuerbaren Energiesystems oder die Prozessumstellung der Stahlerzeugung wirkt sich mittel- bis langfristig positiv auf den Bedarf an Primärrohstoffen aus. Es sollten daher auch von Seiten der Ressourcenschonungspolitik Maßnahmen für technologische Änderungen hin zur Treibhausgasneutralität gefördert und forciert werden.
- ▶ Grundsätzliche Änderungen in Basisindustrien haben große Auswirkungen auf Rohstoffansprunchnahmen und Treibhausgase. Die Zementindustrie und insbesondere die Stahlindustrie sind dafür beispielhaft. Mit den in Deutschland vorherrschenden Technologien (wie Hochöfen) sind die benötigten Einsparungen bei den Treibhausgasen und die Reduktion der Primärrohstoffansprunchnahme nicht zu erreichen. Politische Anstrengungen auch groß-industrielle, strukturelle Forschungen und Investitionen zu forcieren, sind daher nötig und geboten.
- ▶ Nur ein Technologiemix kann helfen die Nachfrage auf eine breitere Rohstoffbasis zu verteilen und mögliche Rohstoffknappheiten zu verringern. Dies spricht für eine offene Forschungsausrichtung bei der Entwicklung neuer Technologien. Dies gilt insbesondere auch mit Blick auf Technologie- und Wissenstransfer, um Beiträge zu passgenauen Lösungen außerhalb Deutschlands leisten zu können. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der in diesem Projekt erfolgten Abschätzungen relevant, welche aufzeigen, dass allein der deutsche Konsum einzelner bis 2050 benötigter Rohstoffe, einen beachtlichen Anteil der aktuell globalen Fördermengen betragen könnte.
- ▶ Auch im Jahr 2050 ist Deutschland weiterhin auf den Import von Rohstoffen, Produkten und Gütern angewiesen. Aufgabe der deutschen Ressourcenpolitik sollte es daher auch sein, die notwendigen Transformationen der Handelspartner hin zu mehr Klima- und Ressourcenschutzpolitik aktiv zu unterstützen. Neben dem Wissens- und Technologietransfer, der auch einen positiven Effekt für die deutsche Wirtschaft haben kann, sind weitere Maßnahmen wie die Verankerung von Ressourcenschonung in bi- und multilateralen Abkommen (z. B. Rohstoffpartnerschaften, Handelsabkommen etc.) erforderlich. Darüber hinaus sollten der Schutz und die nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen ein wichtiges Thema auch im Rahmen des Dialogs mit multilateralen Organisationen und Plattformen (G7/G20, EU, UN) sein.
- ▶ Um die mit der Ressourcennutzung verbundenen Umweltwirkungen zu verringern und gleichzeitig eine koordinierten globalen Umbau hin zu mehr Klima- und Ressourcenschutz zu ermöglichen, sollte sich Deutschland für globale Ziele zur Senkung der Ressourcennutzung einsetzen, Dies könnte durch bestehende bi- oder multilaterale international Abkommen (ähnlich wie dem Pariser Übereinkommen) insbesondere im Bereich des Welthandelsrechts geschehen.

Die konsequente Schließung von Materialkreisläufen im Rahmen der technischen Potenziale ist neben dem Ausstieg aus den fossilen Energien eine der größten Stellschrauben zur Reduktion des RMC. Deutschland benötigt auch im Jahr 2050 weiterhin einen kontinuierlichen Input an Primärrohstoffen in der Größenordnung von 411 (GreenSupreme) bis 603 Mio. t (GreenLate). Der Anteil an stofflich genutzten Sekundärrohstoffen am Gesamtmaterialeinkonsum in RME erhöht sich in allen Szenarien im Zeitverlauf von aktuell 10 % auf 27 % (GreenLate) bis 38 % (GreenSupreme) in 2050. Die Ergebnisse zeigen also, dass Deutschland unter Annahme sehr ambitionierter Recyclingvorgaben weltweit im Jahr 2050 ein sehr viel höheres Maß an Zirkularität erreichen kann. Allerdings sind dazu große Anstrengungen nötig, um die Sekundärmaterialien zur funktionalen stofflichen Nutzung nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit in adäquater Menge und Qualität bereitzustellen.

- ▶ Die konsequente Anwendung und Umsetzung des technischen Fortschritts bei Recyclingtechnologien sind nicht ausreichend. Auch recyclinggerechtere Produktionsweisen und veritable Bewirtschaftungsansätze des anthropogenen Lagers zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen durch Urban Mining Strategien sind erforderlich.
- ▶ Die Entwicklung von selektiven, hochempfindlichen Recyclingtechniken für komplexe Stoffverbünde sowie das vorausschauende Gestalten logistischer und rechtlicher Rahmenbedingungen, mit denen die Nachfrage für qualitätsgesicherte Sekundärrohstoffe gestärkt wird, stellen ein ebenso wichtiges, komplementäres Handlungsfeld dar.
- ▶ Im Zuge einer nachhaltigen Bewirtschaftung von Ressourcen muss eine verlässliche Wissensbasis über die Zusammenhänge zwischen Input- und Outputströmen geschaffen werden, in der Stoffumwandlungen im anthropogenen Lager über lange Zeiträume Berücksichtigung finden. Außerdem bedarf es verstärkt Einzelstoffbetrachtungen der für die Transformation benötigten Materialien sowie geeigneter Instrumente des Wissens- und Informationsmanagements. Um die Wissensbasis entlang von Akteurs- und Wertschöpfungsketten teilen zu können, werden Bewertungsschemata für urbane Minen, digitale Kataster sowie Gebäude- und Güterpässe entwickelt und standardisiert werden müssen.
- ▶ Die genannten Maßnahmen müssen durch fiskalische und ordnungsrechtliche Maßnahmen flankiert werden, welche dazu beitragen, die externen Effekte der Primärrohstoffgewinnung und Verarbeitung zu internalisieren (u. a. durch die Einführung von Primärrohstoffsteuern), Anreize gegen die endgültige Ablagerungen nicht-gefährlicher Abfälle zu setzen (u. a. durch Deponiesteuern), oder Wiederaufbereitungs- und Recyclingprozesse (u. a. durch Mehrwertsteuerbefreiungen) besser zu stellen. Maßgeblich bleibt dabei immer der relative Kostenvergleich zwischen den jeweiligen Primär- und Sekundärmaterialien. Langfristig muss allerdings auch der Nettobestandszuwachs des anthropogenen Lagers insgesamt abnehmen, da ansonsten der steigende Rücklauf an Sekundärmaterialien durch Wachstumseffekte stets überkompensiert wird.
- ▶ Um die vielschichtigen Versorgungsrisiken entscheidend zu mindern und einen tiefgreifenden Ausbau der Umwelttechnologien weltweit zu gewährleisten, werden verstärkt Substitutionstechnologien zur Anwendung kommen müssen, um die entsprechenden Technologierohstoffe zu ersetzen: Sei es durch Materialsubstitution, bei der partiell



Werkstoffe oder Elemente ersetzt werden, technologische Substitution, bei der neue Technologien und Verfahren eingesetzt werden um den gleichen Umweltnutzen zu erzielen oder auch durch funktionale Substitution, bei der ein gänzlich neues Produkt- oder Dienstleistungskonzept eingeführt wird.

- Aufgrund der langen Vorlaufzeiten in der Entwicklung und bei der Marktdiffusion sind regelmäßig aktualisierte und fortgeschriebene Substitutionsroadmaps (Buchert et al., 2019) wie sie das Umweltbundesamt vorschlägt, wichtige Instrumente zur Ausrichtung der Industriepolitik. Derartige Roadmaps können frühzeitig Handlungsbedarfe sichtbar machen, um die identifizierten Substitutionspotentiale gezielt erschließen zu können. Die Handlungsbedarfe können in konkrete Maßnahmen übersetzt und Anreize für Maßnahmen zur Technologieentwicklung, Markteinführung, Marktdurchdringung durch Qualifizierung und Austausch sowie Anpassung der rechtlich-regulatorischen Rahmenbedingungen gegeben werden. Dabei sind immer auch die Grundbedingungen und Besonderheiten des Innovationssystems zu berücksichtigen und die jeweiligen Rollen der Akteure im Innovationssystem sowohl auf Seiten der Politik (z. B. im Rahmen der Forschungs-, Innovations- und Diffusionsförderung) und der Forschungseinrichtungen (z. B. Industrielle Gemeinschaftsforschung, Hochschulen, Großforschungseinrichtungen etc.) als auch auf Seiten der Wirtschaft und Verbände.

Neben der Steigerung der Rohstoffeffizienz stellt auch das konsequente Hinterfragen unseres Konsumverhaltens eine wichtige Stellschraube für die Ressourcenschonungspolitik dar, wie die Szenarien zeigen. Während Veränderungen in Richtung eines nachhaltigen Konsums, beispielsweise die Reduktion des Fleischkonsums, bereits einen wichtigen Betrag zur Reduktion des Rohstoffkonsums leisten, spannen GreenLife und GreenSupreme den Lösungsraum in Richtung Mäßigung des Konsums (neben der o.g. Wohnfläche z. B. auch der Verzicht auf Fernreisen, die Präferenz für langlebige und reparierbare Produkte, Sharingkonzepte/Nutzen statt Besitzen Konzepte etc.) auf. Dem gegenüber zeigt GreenLate eher den Lösungsraum in Richtung eines ambitionierten „Weiter so“ auf.

- Insbesondere GreenSupreme zeigt, dass die Kombination aus Maßnahmen zur Steigerung der Rohstoffeffizienz und der Reduktion der Nachfrage durch eine Veränderung unseres Konsumverhaltens zielführender auch hinsichtlich der globalen Übertragbarkeit ist als eine Fokussierung nur auf Effizienzmaßnahmen. Die deutsche Ressourcenschonungspolitik sollte daher nachhaltigen Konsum auf Basis des Nationalen Programms für nachhaltigen Konsum ambitioniert und verstärkt voranbringen.
- Der (Primär-)Rohstoffaufwand zur Herstellung neuer Güter ist in den meisten Fällen um ein Vielfaches höher als der Rohstoffaufwand zur Erhaltung der Güter. Dies gilt sowohl für langlebige Investitionsgüter wie Gebäude, Fahrzeuge und Möbel wie auch für Güter die eher einer „Mode“ unterliegen wie Kleidung oder schnelle Innovationszyklen aufweisen wie elektronische Geräte. Die Szenarien, insbesondere GreenLife und GreenSupreme, zeigen, dass langlebige und reparaturfähige Güter zu deutlichen Rohstoffeinsparungen führen können. Die deutsche Ressourcenschonungspolitik sollte daher gesellschaftlich tragfähige Konzepte entwickeln, die die Wertschätzung für hochwertige und langlebige Güter hervorhebt.

- Darüber hinaus gilt es aber auch Maßnahmen zur Mäßigung des Konsums zu entwickeln und gesellschaftspolitisch tragfähig umzusetzen. Der aktive Verzicht auf Neues, wie in GreenLife und insbesondere in GreenSupreme unterstellt, ist eine Stellschraube, die deutliche Wirkungen zeigen kann. Denn durch bewussten Verzicht auf Güter werden nicht nur die Rohstoffaufwendungen der Produktion eingespart, vielmehr kann auch der Rohstoff- und Energieaufwand für ihre Unterhaltung und spätere hochwertige Verwertung eingespart werden.

In diesem Projekt wurden neben Rohstoffen nur begrenzt weitere natürliche Ressourcen betrachtet. So werden beispielsweise Aspekte der Flächenneuanspruchnahme für Siedlung und Verkehr, möglicher Umweltwirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien oder der Rohstoffnutzung diskutiert. Eine darüberhinausgehende vertiefte Betrachtung weitere Umweltwirkungen könnte hingegen nicht erfolgen, ist aber für eine gesamtökologische Bewertung unabdingbar.

- Eine Berücksichtigung weitere Ressourcenkategorien (z. B. Wasser und Fläche) sowie Umweltwirkungen (Versauerung, Eutrophierung etc.) kann eine breitere Wissensbasis bereitstellen und möglichen Verlagerungseffekte zwischen einzelnen Ressourcenaufwendungen aufzeigen. Gleichzeitig dienen natürliche Ressourcen wie die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft auch als Senke zur Aufnahme von Emissionen, Ökosysteme stellen weitere essentielle Ökosystemleistungen bereit. Eine vollständige Bewertung der Auswirkungen von Ressourceneffizienzmaßnahmen auf all diese natürliche Ressourcen sowie Umweltwirkungskategorien ist momentan noch nicht einheitlich möglich und sollte in weiteren Forschungsvorhaben untersucht werden.
- Die beschriebenen Umweltwirkungen (Bodle et al., Veröffentlichung in Planung) der Rohstoffproduktion im Bergbau, die zu einem wesentlichen Teil außerhalb Deutschlands auftreten, können zusätzlich zu den beschriebenen Maßnahmen in den Bereichen Rohstoffeffizienz und Konsum durch Maßnahmen in den Bereichen Handelspolitik, Entwicklungszusammenarbeit und Unternehmensverantwortung adressiert werden. Deutschland kann sich auf europäischer Ebene für starke Umweltstandards in Freihandelsabkommen einsetzen, im Rahmen der bilateralen Entwicklungszusammenarbeit in den Partnerländern Kapazitäten für eine effektive Umweltregulierung des Bergbausektors aufbauen, das direkte Engagement von Unternehmen in Deutschland für einen verantwortungsvollen Bergbau im Rahmen von Industrie-Entwicklungspartnerschaften fördern, die Harmonisierung der Standards der zahlreichen entstehenden Zertifizierungsinitiativen unterstützen sowie gesetzliche Regelungen zu ökologischen und menschenrechtlichen Sorgfaltspflichten in Rohstofflieferketten schaffen.

## **6.3 Globale Wirkungen der Transformation des Energiesystems auf die Rohstoffinanspruchnahme**

### **6.3.1 Die globalen Szenarien**

Die bisherigen Darstellungen in fokussieren vor allem die nationale Perspektive und zeigen die Wechselwirkungen (Kapitel 5, 6.1 und 6.2) und systemischen Zusammenhänge (Kapitel 4) von Treibhausgasemissionen und Primärrohstoffinanspruchnahme auf. Wie bereits dargestellt sind

derartige Transformationen der Gesellschaft und Wirtschaft jedoch nicht im Alleingang leistbar. Vielmehr bedarf es einer globalen Entwicklung. Über die heutigen Energie- und Rohstoffmärkte ist das Wirtschaften in Deutschland international stark vernetzt. Kapitel 5.2 zeigt, dass auch in einem treibhausgasneutralen Energiesystem wesentliche Anteile der Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung von global günstigen Standorten importiert werden. Auch die Strukturen zur Versorgung mit Primärrohstoffen werden sich nicht wesentlich verändern. Insbesondere bei letzterem Aspekt ist jedoch die globale Verfügbarkeit und globale Entwicklung mit in den Blick zu nehmen. Dies wurde mit Hilfe des systemdynamischen Modells GEE(R)-(Globale Erneuerbare Energien und Rohstoffe<sup>162</sup>) begrenzt auf das Energieversorgungssystem, also ausschließlich den Ausbau der erneuerbaren Energieanlagen, untersucht. Dabei sollen die Auswirkungen des globalen Ausbaus der erneuerbaren Energien (Windkraft an Land und auf See, und Photovoltaik) für die Strom-, Brenn- und Kraftstoffversorgung im zeitlichen Verlauf auf die Rohstoffinanspruchnahme (Biomasse Metallerze, fossile Energieträger und nichtmetallische Mineralien) aufgezeigt werden. Mit GEE(R) besteht weder der Anspruch einer exakten Simulation aller Sektoren und Technologien noch der einer Vorhersage.

Ziel der Simulationen ist, grundsätzliche Zusammenhänge vor allen Dingen im zeitlichen Verlauf zu zeigen und dabei Muster zu verdeutlichen. Es handelt sich dabei um vereinfachende Annahmen für eine systemdynamische globale Betrachtung, um generelle Herausforderungen zu erkennen. Es wurden hierfür die Green-Szenarien in ihrem Charakter auf die Welt übertragen, wobei die Energienachfrage bis 2040 entsprechend des World Energy Outlook (WEO) (IEA, 2015) unterstellt und dann konstant fortgeschrieben wurde. In den jeweiligen Regionen konnten so auf Basis monatlicher Simulationen die resultierenden Treibhausgasemissionen, die Primärrohstoffinanspruchnahme (RMC) und die groben Kostenverläufe bzw. die Wertschöpfung in den jeweiligen Regionen mit dem GEE(R) Modell ermittelt werden. Um ein Verständnis zu erhalten, welche Auswirkungen entstehen, wenn die Umstrukturierung der Energieversorgung entsprechend der Green-Szenarien global erfolgen, wurden für die verschiedenen Weltregionen entsprechend der jeweiligen Szenariencharakteristika vereinfachende Annahmen getroffen. Dabei werden die Szenarien GreenEe, GreenLate, GreenMe und GreenSupreme sinngemäß global auf die Szenarien GlobalEe, GlobalLate, GlobalMe und GlobalSupreme übertragen.

Dem entgegen wird zum Vergleich ein **GlobalBase-Szenario** dargestellt. Dieses basiert auf dem Basis-Szenario des World Energy Outlook (IEA, 2015) und sieht eine Fortschreibung der Ausbauraten erneuerbarer Energien von 2015 vor. Hierdurch basiert dieses Szenario auch langfristig noch zu wesentlichen Anteilen auf fossilen Energiequellen und wird damit weder den globalen Klimaschutz- noch Ressourcenschutzherausforderungen auch nur im Ansatz gerecht.

Das **GlobalEe-Szenario** orientiert sich an der Charakteristik der beiden GreenEe-Szenarien und legt somit den Fokus auf die Energieeffizienz, siehe auch Kapitel 3.4. Das bedeutet, dass die Nachfrage im Vergleich zum Basis-Szenario niedriger ist und eine starke Verschiebung hin zur Stromnutzung über alle Anwendungsbereiche hinweg erfolgt. Die Umstrukturierung der Anwendungsbereiche wird aus den GreenEe-Szenarien global übertragen und spiegelt sich ähnlich in den Ausbauraten. So wird beispielsweise global unterstellt, dass der Strombedarf im Schwerlastverkehr durch die Integration von OH-LKW erst nach 2030 erfolgt. Die Umstrukturierung und vollständige erneuerbare Energieversorgung ist für Deutschland, den Rest von Europa und Nordamerika 2050 gewährleistet. Die übrigen Regionen erreichen diesen vollständigen Umbau zu erneuerbaren Energien erst 10 Jahre später. Im **GlobalMe-Szenario** wird die Charakteristik von GreenMe auf die anderen Weltregionen und Länder übertragen (siehe Kapitel 3.4). Dabei werden sukzessive materialeffizientere bzw. rohstoffschonendere

---

<sup>162</sup> Sachverständigengutachten: Projektnummer: 105280.

Techniken eingesetzt. Abweichend zu den nationalen Betrachtungen werden die verlängerten Lebensdauern der Aufständigung von PV und der Türme von Windkraftanlagen an Land und deren jeweilige Technologien vernachlässigt.

Das **GlobalLate-Szenario** spiegelt wie GreenLate (siehe Kapitel 3.3) ein verzögertes Handeln, geringere Energie- und Materialeffizienz sowie ein Festhalten an konventionellen Techniken wieder. Dementsprechend ist wie in GreenLate nach 2040 ein erheblicher Investitionsaufwand in den Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich, insbesondere da in der Mobilität und der Wärmeversorgung nur etwa zur Hälfte elektrifiziert wird und in Folge dessen für die Herstellung von strombasierten Brenn- und Kraftstoffen (PtG/PtL) ein höherer Ausbau an erneuerbaren Energien global erforderlich ist.

Das GreenSupreme-Szenario (Kapitel 3.6) ist für Deutschland das ambitionierteste Szenario, in welchem schnell und deutlich die Treibhausgasemissionen durch die Umstellung auf effiziente Sektorkopplungstechniken und durch den schnellen Ausstieg aus der Kohleverstromung reduziert werden. Energie- und Materialeffizienz werden von Beginn an im hohen Maße umgesetzt. Ergänzt werden die technischen Maßnahmen und durch eine noch stärkere Änderung der Verhaltensweise bei Nachfrage und Produktion. Dementsprechend erfolgt ein massiver Ausbau an erneuerbaren Energieanlagen bis 2040. Durch Technologie- und Wissenstransfer sowie gleichberechtigte Partnerschaften wird ein weltweites Voranschreiten im Klima- und Ressourcenschutz gewährleistet, so dass im **GlobalSupreme** weltweit 2050 keine fossilen Energieträger mehr genutzt werden.

In GEE(R) wird der Rückbau erneuerbarer Anlagen am Ende ihrer Lebensdauer und das Recycling der darin enthaltenen Rohstoffe (Eisen Metalle, Nicht-Eisen Unedelmetalle, Aluminium, Seltenerd – Metalle, Neodym, Halbedel – Metalle (Kupfer), Edelmetalle, Silber, Baumineralien, Industriemineralien) im Zeitverlauf bis 2100 berücksichtigt. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien werden Kernkraft und fossile Energieträger ersetzt und die Treibhausgasemissionen sinken. Entsprechend der Szenariencharakteristiken wird eine vollständige erneuerbare Energieversorgung angestrebt. So wird in GlobalSupreme und GlobalMe dies global bereits 2050 erreicht während in GlobalLate und GlobalEe die meisten Länder der Welt erst 2060 dieses Ziel erreichen.

### 6.3.2 Entwicklung der Rohstoffinsprachnahme bei der Transformation des globalen Energieversorgungssystems

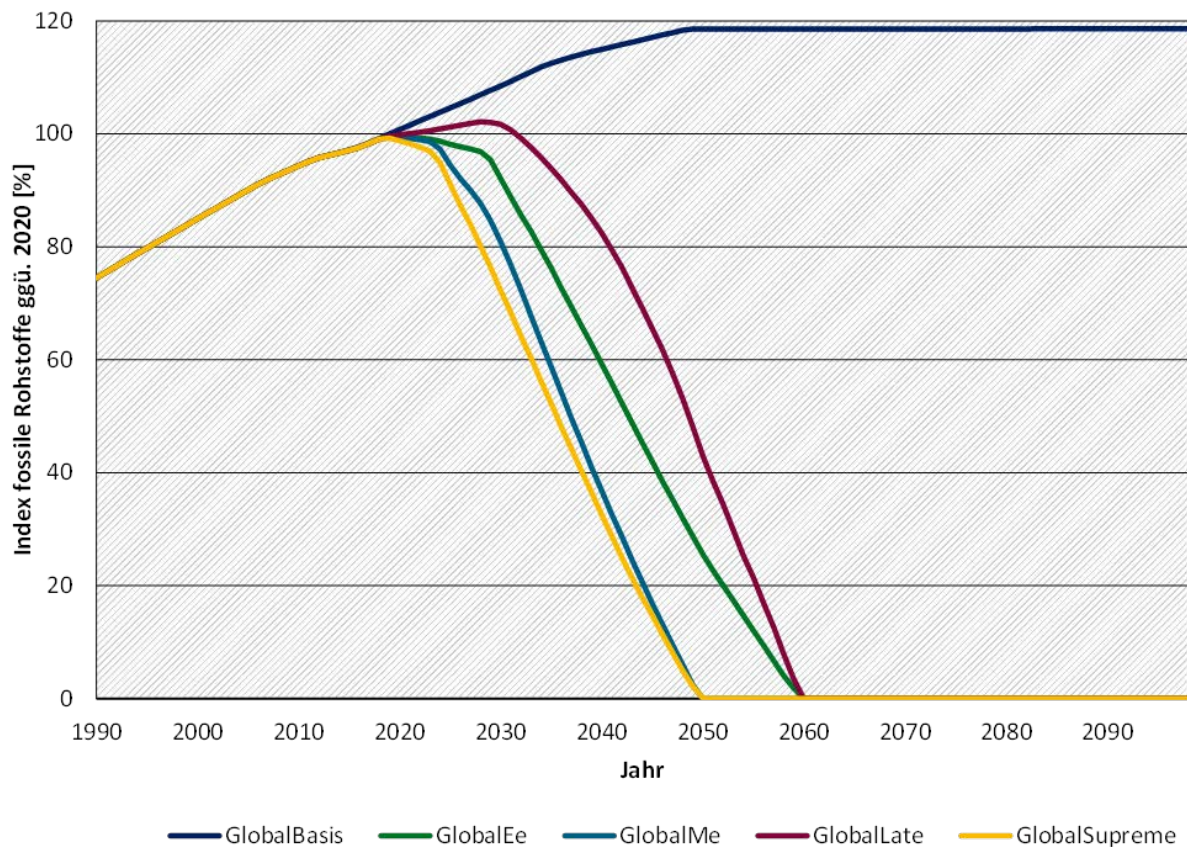
Die Nutzung fossiler Rohstoffe wird in allen Global-Szenarien (außer dem Basiszenario) spätestens bis 2060 auf null abgesenkt. Die Geschwindigkeiten unterscheiden sich hierbei gemäß der Szenariencharakteristika. GlobalSupreme weist durch den schnellen massiven Ausbau der erneuerbaren Energien die schnellste Geschwindigkeit auf. Auch in GlobalMe wird der Anteil der fossilen Energien schnell durch den global beschleunigten Ausbau reduziert. Das GlobalEe-Szenario erreicht erst gegen Ende 2060 die vollständige Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien, ähnlich wie das GlobalLate-Szenario. In Letzterem steigen jedoch nach 2020 die in Anspruch genommenen fossilen Rohstoffe durch den zunächst verzögerten Ausbau der erneuerbaren Energien noch weiter an. Dennoch macht sich auch dort der verstärkte Ausbau im Vergleich zum Basis-Szenario bemerkbar, siehe Abbildung 6-31.

Das Basis-Szenario verfolgt einen sehr moderaten Ausbau der Erneuerbaren Energien. Dieser erfolgt bis 2050 entsprechend dem WEO-Basis-Szenario und wird dann nicht weiter gesteigert. Da laut WEO-Szenarien auch keine weitere Aussage zur Steigerung der Nachfrage nach 2050 getroffen wird, bleibt die Nachfrage (abgesehen von Absenkungen durch Effizienzsteigerungen) in allen Szenarien konstant auf dem Niveau von 2050. Daher zeigt die Kurve des Basis-Szenarios



keine weitere Steigerung. Durch die geringe EE-Ausbaurate sinkt die Kurve zudem auch nicht weiter ab.

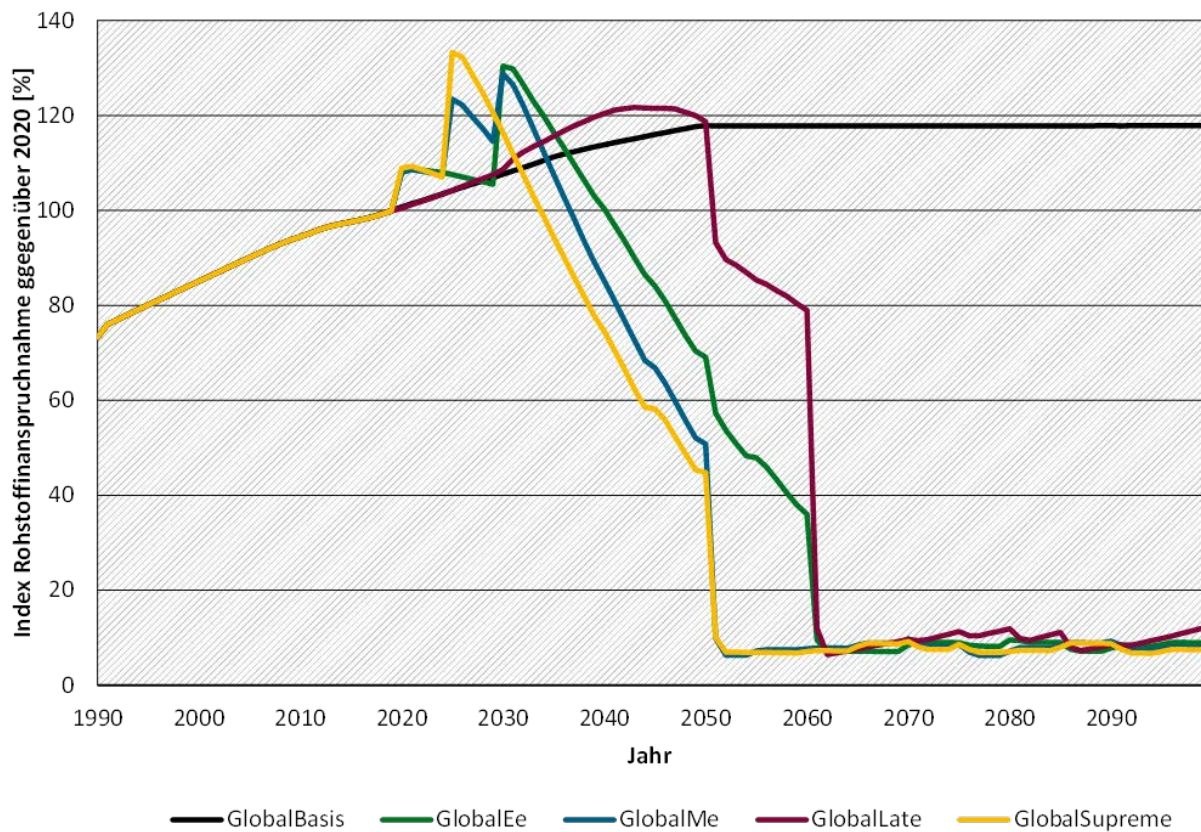
**Abbildung 6-31: Inanspruchnahme fossiler Rohstoffe (jährliche Basis) als Index ggü. 2020**



Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Die unterschiedlichen Ausbaugeschwindigkeiten der erneuerbaren Energien weisen damit entsprechend der Szenariencharakteristika unterschiedliche Wirkungen auf die Rohstoffbilanzen auf. Während die Inanspruchnahme der fossilen Rohstoffe sinkt, zeigt die Abbildung 6-32 die Inanspruchnahme der (Primär)Rohstoffe (fossile, abiotische). Diese ist charakterisiert durch einen klar zu erkennenden Peak bis ca. 30 % höher als die heutige Nachfrage gefolgt von einem starken Absinken auf ca. 12 %. Das starke Absinken lässt sich maßgeblich durch die nicht genutzten fossilen Rohstoffe erklären. Die Peaks kommen durch die hohe zusätzliche Nachfrage nach mineralischen und metallischen Rohstoffen zustande. Die Höhe und der Zeitpunkt der Peaks hängen stark von der Ausbaugeschwindigkeit und den Ausbauzielen ab.

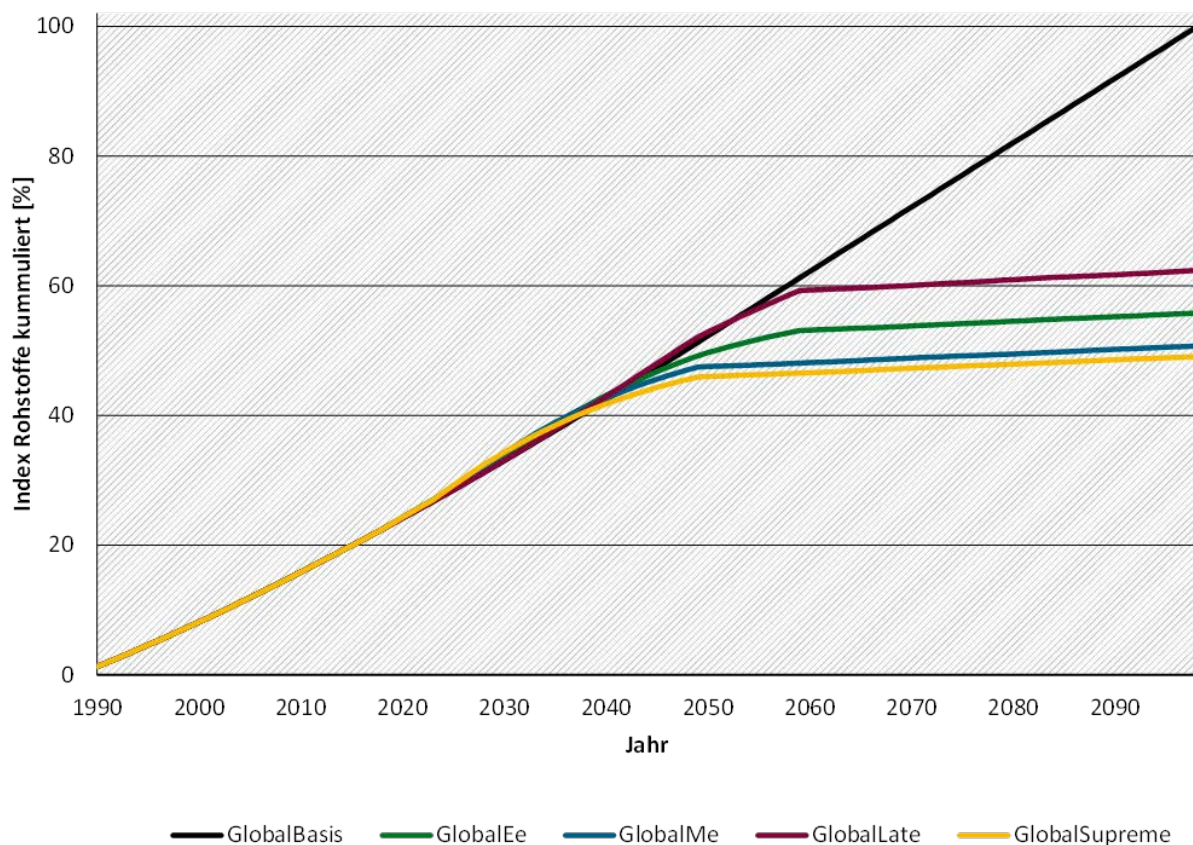
Die Abbildung 6-33 zeigt hierzu die kumulierten Werte (das Integral). Obwohl der frühe massive Ausbau erneuerbarer Energien im GlobalSupreme-Szenario zunächst eine hohe Rohstoffinvestition bedeutet, nimmt der Bedarf insgesamt stark ab, was im gleichzeitigen massiven Rückgang der fossilen Energien begründet ist.

**Abbildung 6-32: Index der Rohstoffinanspruchnahme (fossile, abiotisch) im Energiesystem**

Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Das Integral dazu zeigt, dass sich im Sinne der Rohstoffbilanz der schnelle Ausbau bezahlt macht. So weist GlobalSupreme etwa in 2050 ca. 10 % weniger kumulierte Rohstoffinanspruchnahme als GlobalLate und GlobalBase auf. Langfristiger werden die Unterschiede noch deutlicher.



**Abbildung 6-33: Kumulierte Rohstoffinanspruchnahme für das Erneuerbare Energien System**

Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Grundsätzlich ist auch zu erkennen, dass in allen Szenarien die Rohstoffinanspruchnahme nicht auf null sinkt, sondern eine leichte Oszillation erhalten bleibt. Das hängt – wie im Kapitel 3 (systemischer Zusammenhang Nexus) beschrieben – damit zusammen, dass durch das Recycling zwar grundsätzlich die Rohstoffe im Kreis geführt werden, aber dennoch bei angenommenen Recyclingraten zwischen 80 und 90 % leichte Materialverluste im System durch Primärrohstoffinanspruchnahme auszugleichen sind. Das heißt für den Betrieb des erneuerbaren Energiesystems sind nach wie vor Primärrohstoffe notwendig.

Relevant sind jedoch nicht nur die summarischen Effekte. Insbesondere die Inanspruchnahme sowie die Verfügbarkeit einzelner Rohstoffe und Metalle können bei der Umstrukturierung von Bedeutung sein. Die Halbedelmetalle (hier insbesondere Kupfer und Aluminium) spielen in einem stark strombasierten erneuerbaren Energiesystem eine Schlüsselrolle. Kupfer wird beispielsweise in Windenergieanlagen und Stromleitungen genutzt. Teilweise ist eine Substitution von Kupfer durch Aluminium möglich, aufgrund des höheren Leitungswiderstands jedoch auf Kosten der Effizienz, was wieder ein Mehrbedarf an Kapazitäten darstellt. Kupfer wird heute schon zu über 45 % recycelt (DERA, 2013). In den Simulationen wird eine Recyclingrate von 80 % (vgl. auch Tabelle 6-5) angenommen. Durch den starken Ausbau der Windenergieanlagen an Land und auf See ist zu Beginn des Ausbaus die Nachfrage nach Primärkupfer massiv<sup>163</sup>. Anschließend ist diese Kupfermenge jedoch im anthropogenen Lager gebunden und steht am Ende der Lebensdauer der Anlagen der Sekundärrohstoffwirtschaft für

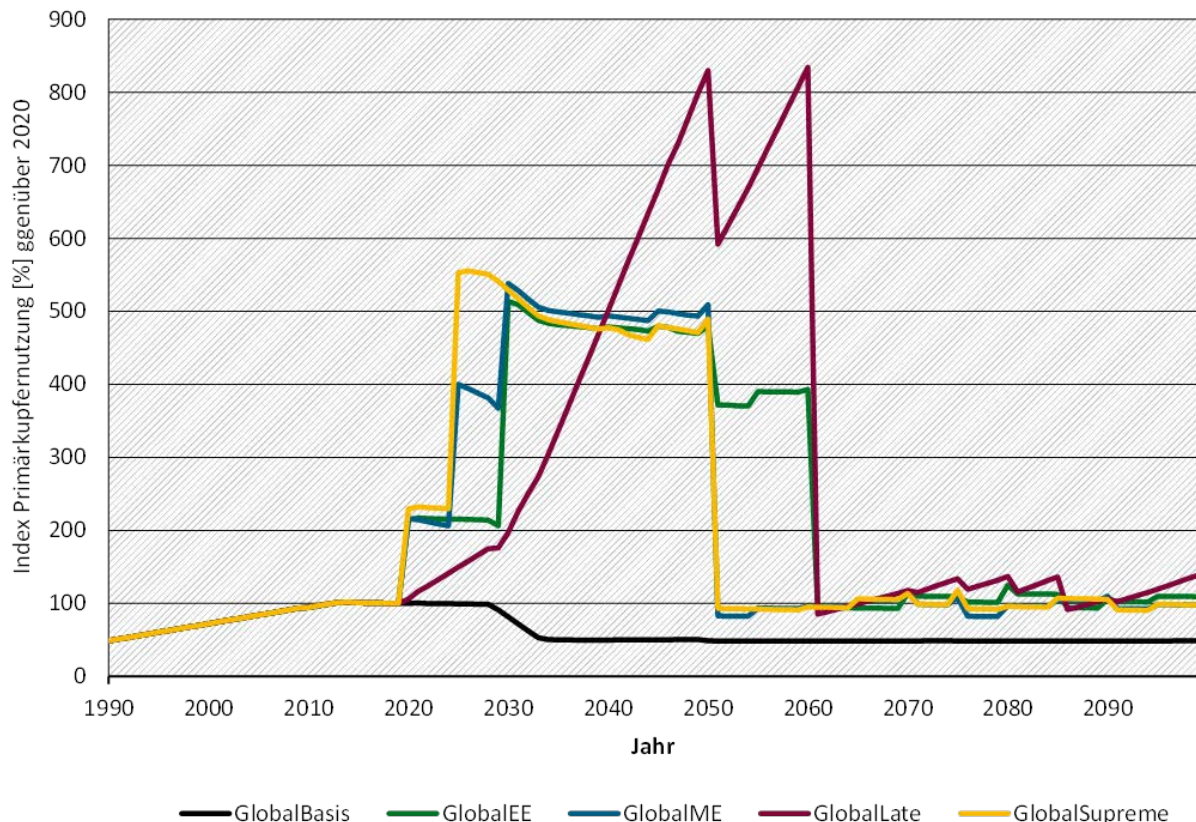
<sup>163</sup> Rahmenannahmen der Referenzanlage: Nennleistung 2,3 MW; Volllaststunden 1.715 h/a; 82 m Rotordurchmesser; 108 m Nabenhöhe; Material- und Rohstoffaufwand in g/kWh: summarischer Rohstoffaufwand 102,31 t, davon Eisen 22,69 t, Nicht-Eisen Unedelmetalle 11,5 t, Halbedelmetalle 31,23 t, Edelmetalle 0,02 t, Bauminerale 21,85 t, basierend auf (Wiesen et al., 2017).

das Recycling zur Verfügung. Langfristig wird sich somit aus systemischer Sicht eine Art Fließgleichgewicht einstellen, so dass lediglich funktionale Verluste, Downcycling und dissipative Verwendungen sowie durch die Erneuerung und Instandhaltung von Gütern und Anlagen durch Primärrohstoffe ausgeglichen werden müssen. Allerdings ist es erforderlich, dass entsprechende Anlagenkapazitäten für das Kupferrecycling und auch die Kapazitäten für den Abbau der Halbedelmetalle vorhanden sind bzw. waren. Auch ist der Zeitpunkt der Inanspruchnahme des Kupfers zu beachten.

In der folgenden Abbildung 6-34 wird die Nachfrage nach Primärkupfer dargestellt. Die Szenarien GlobalSupreme, GlobalEe und GlobalMe zeigen einen sprunghaften Anstieg verbunden mit dem massiven Ausbaustart der erneuerbaren Energien. Es folgt - Annahmen bedingt - ein kleiner Sockel, welcher mit dem verzögerten Beginn des Ausbaus in anderen Weltregionen verbunden ist und zu einem weiteren ausgeprägten Nachfragepeak bis 2030 führt. Das leichte „Absinken“ der Kurven auf den Treppenstufen wird im Modell durch die angenommene sinkende Stromnachfrage durch Effizienzsteigerung und Vermeidungseffekte hervorgerufen. Die extrem hohen Peaks in GlobalLate kommen durch den verspäteten und dann kompensierend hohen Ausbau zustande. Der zweite Peak ist jeweils auf die global verzögert ausbauenden Länder zurück zu führen.

GlobalBasis ist gekennzeichnet durch einen geringen Ausbau an Erneuerbaren Energien und entsprechend gibt es dort nur eine geringe Nachfrage nach Kupfer. Allerdings wird in Anlagen gebundenes Kupfer dann auch nach der entsprechenden Zeit wieder für Recycling frei. Entsprechend sinkt die Nachfrage nach Primärkupfer. Da weitere Ausbauimpulse fehlen, kommt es auch im Weiteren nicht zu erkennbaren Ausschlägen.

**Abbildung 6-34: Inanspruchnahme von Primärkupfer für das Erneuerbare Energie System**

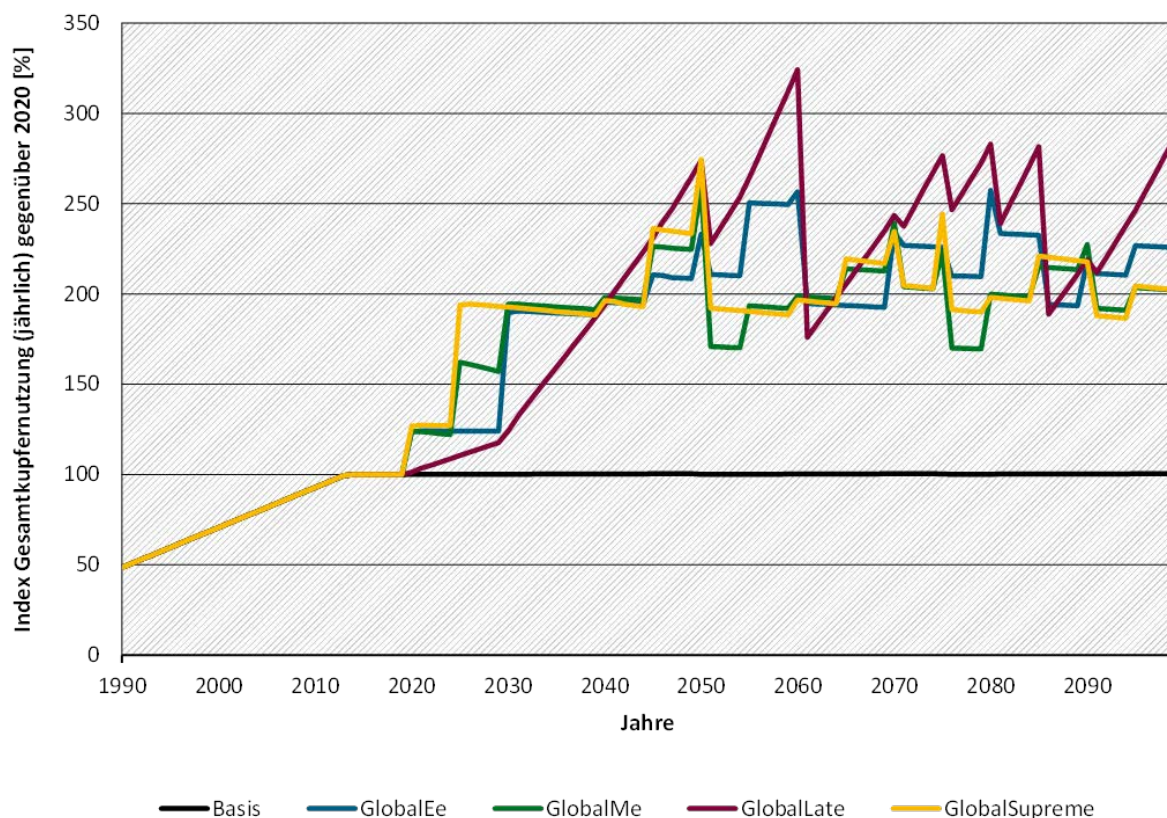


Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19



Mit dem Erreichen der vollständigen Versorgung mit erneuerbaren Energien in 2050 bzw. 2060 sinkt die Nachfrage nach Primärkupfer wieder stark ab. Die langfristigen leichten Oszillationen in allen Szenarien (außer dem Basis-Szenario) sind durch das bereits erwähnte Fließgleichgewicht und dem Ausgleich nicht vermeidbarer Verluste der Sekundärrohstoffwirtschaft durch Primärkupfer zu erklären. Die kleineren „Zwischenpeaks“ entstehen im Kurvenverlauf dadurch, dass nach 20 Jahren (Windkraftanlagen) bzw. 25 Jahren (Photovoltaik) die Nutzungsdauer der EE-Anlagen erreicht ist und es zum Repowering kommt. Entsprechend wird ein Teil des Kupfers aus dem Recycling gewonnen und ein weiterer Teil als Primärrohstoff. Damit wird deutlich, dass strukturell der Ausbau in den kommenden Jahren auch bereits Auswirkungen auf das Wirtschaften der betroffenen Branchen in zwei bis drei Jahrzehnten hat. Das GlobalLate-Szenario sticht besonders hervor. Der späte Ausbau, – der dann intensiv –erfolgt, führt zu einer extrem hohen Nachfrage. Entsprechend deutlich wird dann auch der Recycling-Knick in der Nachfrage des Primärkupfers. Dies wird in der folgenden Abbildung 6-35 noch einmal deutlicher. In dieser wird die Summe der Inanspruchnahme an Primärkupfer und Recyclingkupfer für die Szenarien dargestellt. Hier liegen mehrere Dynamiken von Ausbau, Repowering und Recycling übereinander: Steigt der Ausbau „sprunghaft“ an, so werden am Ende der Lebensdauer diese Anlagen „sprunghaft“ rückgebaut und es stehen ebenso plötzlich - hohe Recyclingkapazität angenommen - Recyclingrohstoffe zur Verfügung. Gleichzeitig entsteht durch den Bedarf an Anlagen für das Repowering bis zur vollständigen Transformation des Energiesystems ein zusätzlicher Bedarf an Rohstoffen, da der „Netto-Ausbau weiterhin erfolgt. Je nachdem in welcher Ausbaudynamik sich Länder und Regionen befinden, fällt hoher Ausbau mit Repowering zusammen, es entsteht ein markanter Peak. Diese Dynamik wird in der folgenden Abbildung 6-35 noch einmal deutlicher.

**Abbildung 6-35: Inanspruchnahme des Kupfers (Primär- und Sekundärrohstoff)**



Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Das bedeutet auch, wenn, wie in GlobalLate, Vermeidung und Effizienz nicht konsequent umgesetzt werden und stattdessen Großteils eine eins zu eins Substitution erfolgt, werden deutlich mehr Rohstoffe benötigt. Die Nachfrage ist deutlich disharmonischer, was zu entsprechenden Wirkungen für den Rohstoffmarkt führen wird. Bei hoher Nachfrage würden Preise steigen, bei geringer Nachfrage entsprechend sinken. Die Primärrohstoffe werden im Bergbau gewonnen. Der Bergbau ist insgesamt relativ träge: die Einrichtung einer neuen Förderstellen dauert lange und ist aufwendig. Die Produktion lässt sich nicht einfach an und ausschalten. Sollten also entsprechend hohe Bergbaukapazitäten installiert sein, konkurrieren Sekundär- und Primärrohstoffe auf dem Markt. Das Modell lässt hierzu allerdings keine Aussagen zu, es ist allerdings damit zu rechnen, dass die Wirkungen auf Preisbildung und Arbeitsplätze erheblich sein werden.

Die Inanspruchnahme des Kupfers entspricht ungefähr der zwei (GlobalSupreme, GlobalEe, GlobaleMe) bis in Spitzen dreifachen Menge (GlobalLate) der heutigen (realen) Inanspruchnahme (siehe Abbildung 6-35). Während im Modell keine limitierenden Annahmen zu den Bergbaukapazitäten getroffen wurden, sind diese in der Realität sehr wohl begrenzt. Für die hier dargestellten Ausbaubedarfe werden erhebliche Mengen an Kupfer (high grade / low grade)<sup>164</sup> benötigt (vgl. auch Abbildung 6-36 und Abbildung 6-37), so dass auch die Bergbaukapazitäten erheblich ausgebaut werden müssten. Durch die dynamische Betrachtung wird allerdings auch deutlich, dass die Nachfrage zyklisch verläuft.

Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoller den Ausbau langfristig orientiert harmonisch zu gestalten und damit abrupte Änderungen und peaks im System möglichst gering zu halten. Damit ließen sich die skizzierten Folgen für den Rohstoffsektor verhindern.

Der Verlauf wie im Falle des GlobalLate-Szenarios (in Abbildung 6-35) zeigt mit seinen starken Spitzen einen äußerst ungünstigen Verlauf, den es gilt zu verhindern. Hier folgt einer Zeit sehr hoher Nachfrage an Kapazitäten für die Kupferbereitstellung nach wenigen Jahren eine Zeit mit sehr geringer Nachfrage. Industriepolitisch würde dies zu Verwerfungen und Strukturbrüchen führen, da Anlagekapazitäten zyklisch auf- und abgebaut werden beziehungsweise nicht genutzte Kapazitäten vorgehalten werden müssten.

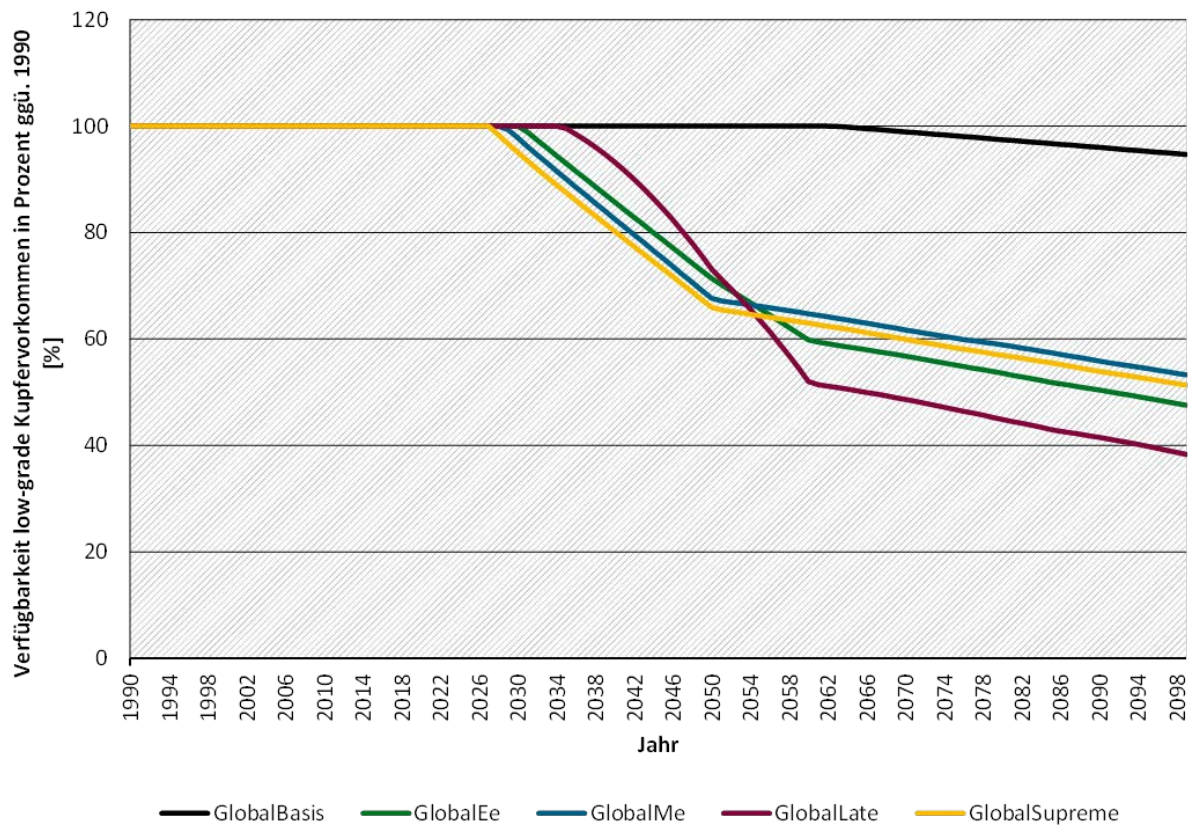
Die Abbildung 6-36 zeigt die Potentiale für high grade und low grade Reserven des Kupfers und wie die Dynamik der Nutzung dieser Vorkommen ist. Entsprechend der heutigen Situation werden neben den high-grade-Vorkommen auch die low-grade-Vorkommen genutzt. Die Gewinnung und Aufbereitung der low-grade-Vorkommen ist derzeit deutlich aufwendiger, da der Metallgehalt in den Erzen niedriger ist und aufkonzentriert werden muss. Sobald die high grade Reserven aufgebraucht sind, werden der Aufwand und damit v.a. die Kosten höher<sup>165</sup>. Damit entsteht – ohne exakte Vorhersagen zu machen – die Dynamik, dass eine sehr hohe Nachfrage auf hohen Gewinnaufwand und damit auf hohe Preise treffen wird. Eine eindeutige Prognose ist hierzu im Modell nicht möglich. Je nach technologischer „Lernkurve“/Fortschritt, kann je nach zeitlicher Dynamik der Ausbau volkswirtschaftlich ungünstig verlaufen, wenn die niedrigeren Erzgehalte erschlossen werden müssen. So gesehen kann es für eine Volkswirtschaft sinnvoll sein, einerseits den verstärkten Ausbau zu realisieren, solange high-grade-Vorkommen vorhanden sind und gleichzeitig in die nationale Technologieweiterentwicklung investiert werden muss. Eine volkswirtschaftliche Bewertung

<sup>164</sup> Im Modell werden vereinfachend drei Gruppen an Erzgehalten in den Lagerstätten verwendet. Damit kann später auch der Aufwand (Energie, Investitionen) geschätzt werden, denn je geringer der Erzgehalt, desto aufwendiger und energie- und kostenintensiver wird der Abbau. High grade umfasst die Metall-Konzentrationen von 10 – 400 kg/t, low grade von 2-10 kg/t Erz und ultra low grade 2-0,4 kg/t (Sverdrup & Ragnarsdottir, 2014).

<sup>165</sup> Siehe allerdings auch Kapitel 6.2.8.1: „Die technologische Entwicklung hat bislang zu Produktivitätssteigerungen geführt, so dass auch Rohstoffe bei geringerem Erzgehalt gewinnbringend abgebaut werden und Energiemehraufwendungen teilweise sogar überkompensiert werden konnten (Rötzer & Schmidt, 2018).“

geht über die rein preisliche Bewertung der Energiebereitstellung hinaus, da sie den Anteil der Wertschöpfung im Inland berücksichtigt. Mit anderen Worten: ein Ausbau von Erneuerbaren Energien schafft je nach benötigtem Import von Rohstoffen und Anlagen Arbeitsplätze in der Region. Umgekehrt können sich Erneuerbare Energien volkswirtschaftlich negativ auswirken, wenn zuvor die fossilen Energieträger mit hoher Wertschöpfung aus der eigenen Region kamen und sogar exportiert wurden.

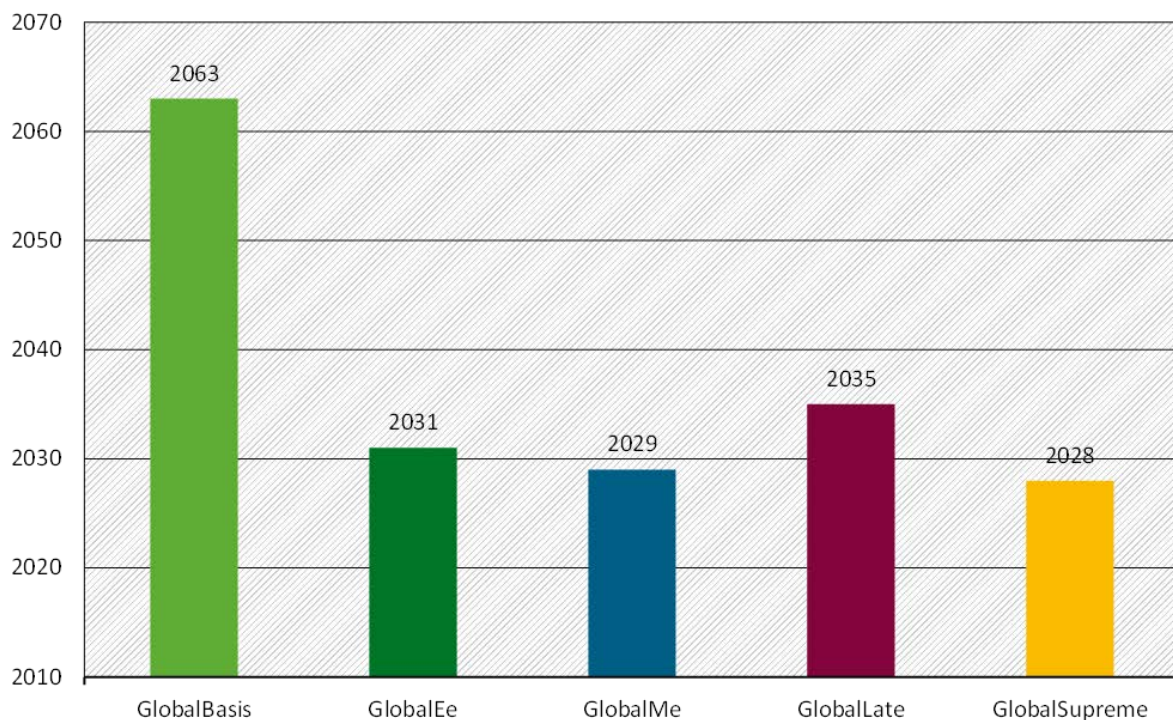
**Abbildung 6-36: Low-grade-Vorkommen von Kupfer in den Global-Szenarien**



Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Aus der Abbildung 6-37 wird deutlich, dass in allen Ausbau-Szenarien die high-grade-Vorkommen deutlich vor dem Ausbauende erschöpft sind. Das würde sich auch dann nicht ändern, wenn neuere Verfahren zur effizienten Gewinnung der Rohstoffe angewendet werden würden.



**Abbildung 6-37: Erschöpfung der High-grade Vorkommen von Kupfer in den Global-Szenarien**

Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Wie anhand Abbildung 6-36 und Abbildung 6-37 diskutiert, kann festgehalten werden, dass Rohstoffe für vor allem für den Bau der Energieerzeugungsanlagen Kosten erzeugen (Investitionen). Im Modell wird diesem Umstand vereinfacht Rechnung getragen. Es wird unterschieden, ob es sich um Sekundärrohstoffe oder Primärrohstoffe aus high-grade- oder low grade-Vorkommen handelt. Der Bau einer Anlage bedingt Investitionen in einer Region. Abschreibungen der EE-Anlagen sowie der Anteil an der Wertschöpfung werden dabei im Modell berücksichtigt. Gleichzeitig findet durch den Betrieb in der Region eine Wertschöpfung statt und die Anlage enthält Rohstoffe, die wertschöpfend recycelt werden können. Dabei müssen Regionen, die einen hohen Anteil an Export von fossilen Rohstoffen haben, zwangsläufig „verlieren“, wenn die Nachfrage nach fossilen Rohstoffen zurückgeht. Nur wenn in diesen Regionen ein schneller EE-Ausbau stattfindet, beispielsweise gekoppelt mit der Produktion synthetischer Kraftstoffe, können diese Nachteile kompensiert werden. So könnte die Infrastruktur der fossilen Rohstoffe auch für den Export synthetischer Kraftstoffe genutzt werden. Hingegen wirkt sich die regionale Wertschöpfung über den Bau und Ertrag der erneuerbaren Energien Anlagen in vormals Rohstoffimport abhängigen Regionen volkswirtschaftlich positiv aus auch wenn zunächst durch den Bau der Anlagen zumindest anteilig Importe von Anlagen und Rohstoffen notwendig werden.

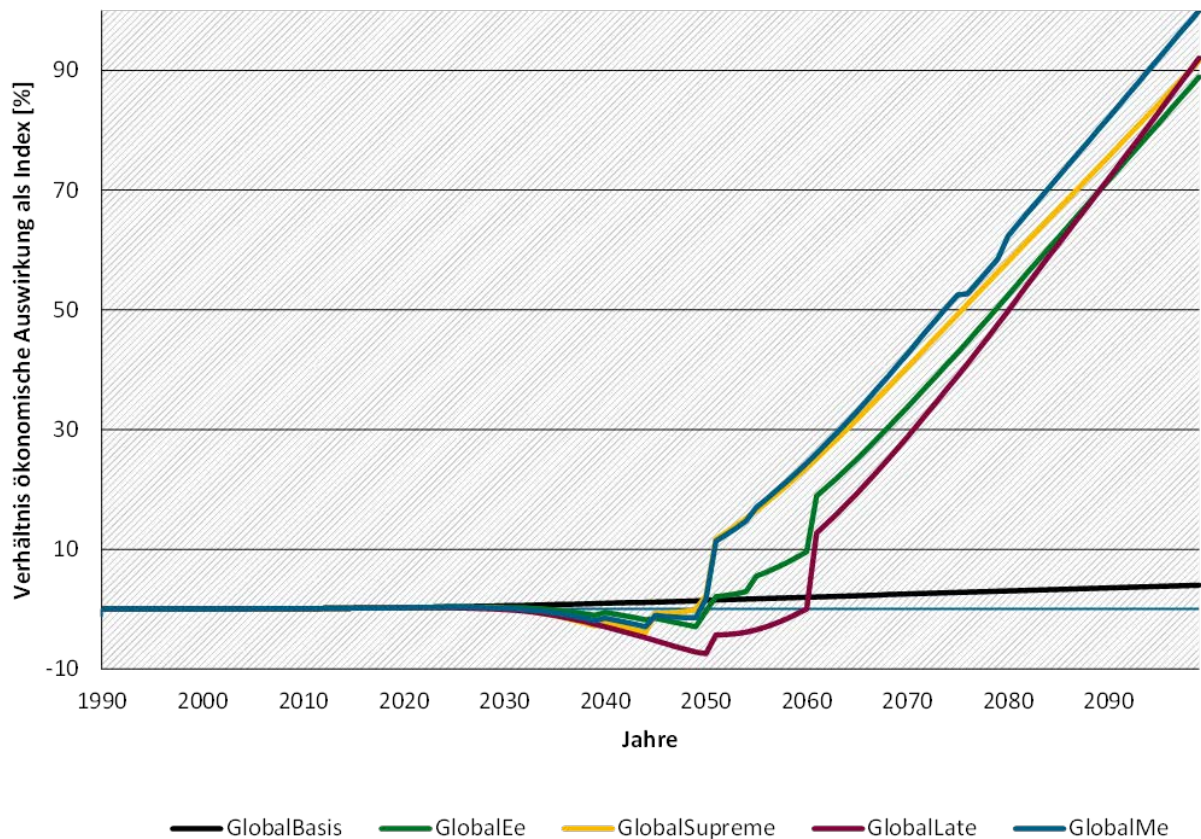
Was der Ausbau der Erneuerbaren Energien wirklich kostet, kann dabei natürlich nicht genau simuliert werden, aber es können mit dem Modell Größenordnungen und Grundzusammenhänge vermittelt werden. Diese generischen volkswirtschaftlichen Auswirkungen werden in der folgenden Abbildung 6-38 deutlich.

Der Ausbau der Erneuerbaren Energien wird zunächst Aufwand erzeugen, langfristig wird es aber volkswirtschaftlich global erheblich günstiger, wenn die Kosten je Energieeinheit sinken und die Wertschöpfung besser auf alle Regionen verteilt wird. Auch zeigen sich markante Unterschiede in den Szenarien: der späte Ausbau im GlobalLate-Szenario führt nicht nur, wie weiter oben ausgeführt, zu höherem Rohstoffbedarf, sondern auch langfristig zu höherem



volkswirtschaftlichem Aufwand. Das Basis-Szenario schreibt den status quo quasi fort. Es kommt in diesem Szenario zu keinen großen Verschiebungen von Importen und Exporten. Daher zeigen sich hier kein oder kaum) volkswirtschaftlicher Aufwand, der volkswirtschaftliche Nutzen ist langfristig allerdings auch kaum gegeben.

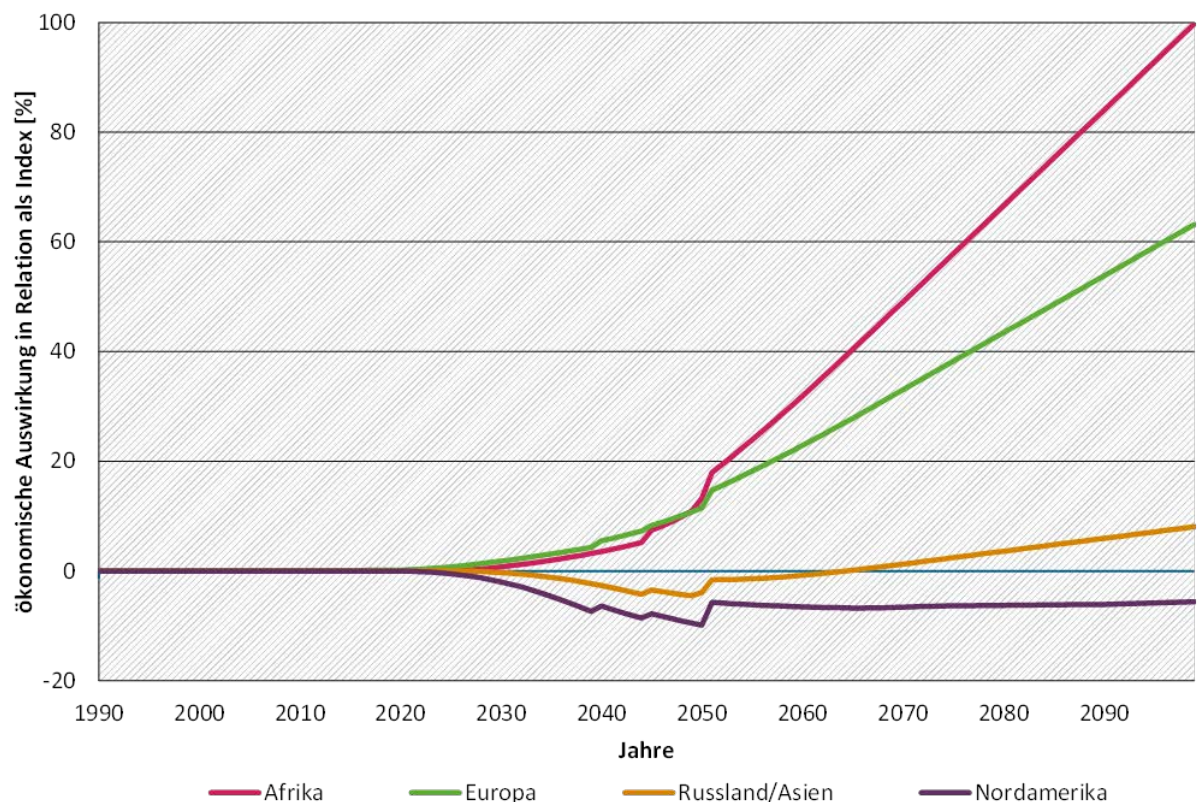
**Abbildung 6-38: Vergleich der globalen Entwicklung der volkswirtschaftlichen Auswirkungen**



Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

In der folgenden Abbildung 6-39 wird für das GlobalSupreme-Szenario ein Vergleich des volkswirtschaftlichen Aufwands für einen Teil der im Modell verwendeten Regionen gezeigt. Je nach Ausgangslage der Regionen (Energienachfrage, Importabhängigkeit, Exportrate) führt der Ausbau der Erneuerbaren Energien zu einer unterschiedlichen Bilanz. Für die beiden Regionen Europa und Afrika sinken die volkswirtschaftlichen Kosten mit dem Ausbau der EE, während für Nordamerika und Russland der volkswirtschaftliche Aufwand ungünstiger ist.

**Abbildung 6-39: Volkswirtschaftlicher Auswirkungen im Vergleich der Regionen im Global Supreme-Szenario**



Quelle: eigene Berechnung auf Basis des GEE(R)-Modells, v19

Der Faktor „volkswirtschaftliche Auswirkungen“ im Modell wird stark dadurch getrieben, wie viele der benötigten Rohstoffe für den Ausbau der EE nicht mehr importiert werden müssen, sondern durch Recycling aus der Region genutzt werden können. Es ist noch einmal wichtig an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass es sich um einen Ausschnitt nur des EE-Systems handelt und nicht die gesamte Volkswirtschaft einer Region abgebildet wird. Dennoch gibt dieser Faktor Hinweise darauf, ob und unter welchen Bedingungen (und Voraussetzungen) der Ausbau der EE volkswirtschaftlich getrieben werden könnte. Das ist für die Gestaltung der Politik bzw. zur Analyse von Widerständen ein wichtiger Aspekt.

Regionen wie beispielsweise der mittlere Osten, der aktuell einer der Hauptexporteure für fossile Rohstoffe ist, könnten ähnlich wie Nordamerika einen hohen volkswirtschaftlichen Nachteil haben, aufgrund der stark fossile Rohstoffe exportierenden Wirtschaft. Hingegen sieht das Bild anders aus, wenn den Kosten des Ausbaus die eingesparten Betriebskosten aus der fossilen Energieerzeugung erhöht um eine Einpreisung des CO<sub>2</sub> gegenübergestellt werden. Das führte dann durchaus zu einer hohen Wirtschaftlichkeit auch im Mittleren Osten.

Global betrachtet gleichen sich zwischen den Regionen die Effekte aus – jeder Import ist woanders ein Export. Der Gewinn für die globale Gesellschaft liegt in der Nachhaltigkeit durch den Umbau – weniger Folgekosten durch Umweltbelastung, Klimawandel und Knappheit fossiler Brennstoffe, sowie oben beschrieben in der Kostensenkung, Effizienzsteigerung und potentiell besser verteilten Wertschöpfung. Einzelne Regionen können durchaus einen Wettbewerbsvorteil haben, wenn sie früh mit dem Umbau beginnen. Auf der anderen Seite werden die Technologien besser und wenn die Rohstoffe knapper und teurer werden, kostet das vermeintlich preiswertere Material aus Recycling von früh errichteten Anlagen doch wieder den

Preis, den der Rohstoff zu dem Zeitpunkt am Markt hat – mit entsprechend hohem Gewinn für die, welche den Rohstoff auf den Markt bringen. Produktionskapazitäten für Photovoltaik, Elektrolyseure und Windenergie aufzubauen sichert die Wertschöpfung in der eigenen Region. Andere erst einmal die Lernkurven durchlaufen zu lassen, senkt die Kosten. Gleichzeitig führen Ausbau- und Nachfrage-Peaks zu Engpässen in Produktionskapazitäten.

Die genannten Effekte können in dem vorliegenden Modell nicht vollständig erfasst werden. Insgesamt wäre eine detailliertere und auf volkswirtschaftlichen Kennzahlen basierte weitergehende Modellierung notwendig, um hier über die skizzierten Wirkungen und Muster hinaus ökonomische Aussagen treffen zu können.

### **6.3.3 Schlussfolgerungen aus der globalen Betrachtung**

Das Ziel der globalen systemdynamischen Betrachtung ist, die Wechselwirkungen zwischen Rohstoffnutzung und Reduktion der Treibhausgasemissionen aus dem Energiesystem im Zeitverlauf darzustellen. Anders als in den auf Stützjahren basierenden Darstellungen der vorangegangenen Kapitel können die Verläufe, die durch Verzögerungen und Rückkopplungen im System erzeugt werden, erfasst und bewertet werden, denn Stützjahre blicken auf das Gleichgewicht in dem jeweiligen Jahr, aber nicht die dynamischen Alter der zu recycelnden Anlagen bis hin zu diesen Zeitpunkten.

So verdeutlichen die globalen Simulationen, dass verschiedene Dynamiken sich überlagern können und ökonomische und organisatorische Auswirkungen mit sich führen.

- ▶ Ein schneller globaler Ausbau an erneuerbaren Energieanlagen führt zu einer erheblichen Nachfrage an Primärrohstoffen. Diese stehen jedoch zum Großteil am Ende der Lebensdauer der Anlagen wieder als Sekundärrohstoffe zur Verfügung, entsprechende Kapazitäten der Recyclinganlagen vorausgesetzt.
- ▶ Erfolgt der Ausbau der erneuerbaren Energien global zu unterschiedlichen Zeiten, steigt zwar auch die Nachfrage nach den benötigten Rohstoffen signifikant, allerdings kann diese besser vom Weltmarkt gewährleistet werden. Sobald global gleichzeitig oder Länder nur leicht versetzt beginnen, steigt die Nachfrage auf ein Vielfaches der heutigen Förderraten an (am Beispiel von Kupfer je nach Szenario auf das bis zu 8-fache, vgl. Abbildung 6-34).
- ▶ Auch im Fall, dass der Ausbau erneuerbarer Energien mit dem Repowering aus vorangeschrittenen Ländern zusammenfällt, ist mit erheblichen Bedarfsspitzen zu rechnen.

Die hohen zwischenzeitlichen Bedarfe haben auch potenziell globale wirtschaftspolitische Implikationen, insbesondere bei Bau- und Bergbaukapazitäten. So müssten große Bergbau- und Recyclingkapazitäten quasi an- und dann wieder ausgeschaltet werden. Zusätzlich zeigt sich, dass high grade Lagerstätten frühzeitig erschöpft sein werden. Damit wird deutlich, dass „First-Mover“ durch schnellen Ausbau der erneuerbaren Energien ökonomische und strukturelle Vorteile erlangen können.

- ▶ Die Global-Szenarien verdeutlichen somit, wie auch die nationalen Green-Szenarien, dass ein gemeinschaftliches globales Denken und schnelles Handeln unabdingbar sind, um Strukturbrüche in einzelnen Weltregionen oder für einzelne global relevante Sektoren (z. B. Bergbau) zu vermeiden und im Sinne der Agenda 2030 eine nachhaltige globale Entwicklung zu ermöglichen.



- Hieraus ergibt sich auch die Notwendigkeit, dass solche „First-Mover“ im Sinne der globalen und historischen Verantwortung entsprechende technische und vor allem auch finanzielle Förderungen für nachfolgende Länder übernehmen müssen, um den globalen Umbau des Energiesystems ohne weitere sozialen Verwerfungen zu ermöglichen.

Die Vielfalt der Annahmen, die bei der Übertragung auf die globalen Simulationen zu treffen sind, ist groß. Die Dynamiken, deren Größenordnung und die grundsätzliche Logik der Szenarien sind dennoch robust. Annahmen zu Wetter, jahreszeitlichem Verlauf, Potentiale für Windenergie (offshore, onshore) und PV in den jeweiligen Regionen sind im Verhältnis zu Deutschland angepasst worden. Im Detail aber wird es insbesondere auf globaler Ebene Glättungen der Extreme und Verzögerungen der Gesamtentwicklung geben. Dennoch sind regionale Besonderheiten nicht im Detail abbildbar, wie beispielsweise regionale Verfügbarkeiten oder Knappheiten von Rohstoffen, geopolitischen Entwicklungen und technische Entwicklungen. Auch spielen Leitungen und / oder regionale Besonderheiten aufgrund der Geographie eine Rolle, die in der Modellierung nicht berücksichtigt werden können. So sind einige Annahmen z. B. hinsichtlich der Speicheranlagen oder zusätzliche Anteile von Wasserkraft nicht einfach aus den GEER-Szenarien global übertragbar. Die fortgeführte Verbreitung des westlichen Lebensstandards und die globale Urbansisierung führen aber dazu, dass die benötigten Energiemengen in ihren Größenordnungen die benötigten Energiemengen, Anlagen für erneuerbare Energien und dafür benötigte Rohstoffe durchaus gut abschätzbar sind.

- Um die aufgezeigten sprunghaften Rohstoffnutzungssteigerungen abzumildern, sollte die globale Transformation des Energiesystems auf eine breite technologische Basis gestellt werden. Dies spricht für eine offene Forschungsausrichtung bei der Entwicklung neuer Technologien.
- Um die notwendigen schnellen technischen Fortschritte global zu befördern, sind globale Partnerschaften für einen Wissens- und Technologietransfer erforderlich.



## 7 Schlussfolgerungen

### 7.1 Zentraler Handlungsbedarf

Die RESCUE-Studie spannt mit ihren Green-Szenarien den Lösungsraum für den Weg in ein treibhausgasneutrales Deutschland auf und beschreibt die entsprechenden Handlungsspielräume. Vor dem Hintergrund der globalen Herausforderungen des Klima- und Ressourcenschutzes lassen sich hieraus zentrale Handlungsbedarfe und, aufbauend auf den beschriebenen Maßnahmen, Handlungsoptionen innerhalb des Lösungsraums ableiten.

Die RESCUE-Studie verdeutlicht die dabei auch die Notwendigkeit einer systemischen Herangehensweise unter Berücksichtigung der diversen Wirkungszusammenhänge. Denn über verschiedene Wechselwirkungen sind alle Bereiche, also Nachfrage- und Produktionsbereiche sowie Infrastrukturen, miteinander verknüpft – und damit auch deren Transformation zum Erreichen der Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2050 sowie für eine nachhaltigere Nutzung der natürlichen Ressourcen. Auch wird deutlich, dass auf allen Ebenen gemeinschaftlich ambitioniert vorangeschritten werden muss, um einen nachhaltigen Klima- und Ressourcenschutz zu gewährleisten. Es ist nicht ausreichend, dass nur die technischen Möglichkeiten zur Treibhausgasminderung und Reduzierung der Rohstoffinanspruchnahme gehoben werden oder der Fokus nur auf die fossile Energiewirtschaft gerichtet wird. Stattdessen muss integriert vorgegangen werden. Um die technischen Maßnahmen für Klima- und Ressourcenschutz zu unterstützen, ist es deshalb zusätzlich notwendig, dass auch Änderungen im Konsumverhalten, zum Beispiel eine fleischarmere Ernährung oder eine Entscheidung für reparaturfähige, langlebige Produkte, die Transformation hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft ermöglichen. Gleichzeitig wird deutlich, dass Klima- und Ressourcenschutz nicht allein auf nationales ambitioniertes Handeln begrenzt sein können. Vielmehr müssen gemeinschaftliche Lösungen in der Weltgemeinschaft gefunden werden. Beispielsweise ist die Umstellung auf eine erneuerbare Energieversorgung in Deutschland nur durch gleichberechtigte Kooperationen mit dem Ausland und offene Bereitschaft zur Unterstützung möglich. Auch der Schutz und die Stärkung natürlicher Senken für Kohlenstoff auf globaler Ebene ist eine zentrale Aufgabe partnerschaftlicher Zusammenarbeit der internationalen Gemeinschaft.

Die Green-Szenarien zeigen verschiedene Wege in eine treibhausgasneutrale Gesellschaft auf, bei gleichzeitiger Schonung der natürlichen Ressourcen. Allen Green-Szenarien gemein ist, dass für die Umsetzung dieser Pfade erhebliche technische Entwicklungen und Innovationen sowie ein deutlicher gesellschaftlicher Wandel auf allen Ebenen in den kommenden 30 Jahren erfolgen müssen. So werden für Deutschland die Treibhausgasminderungen (ohne LULUCF und internationale Verkehre) bis 2050 von 95,4 % in GreenLate bis hin zu 97,1 % in GreenSupreme gegenüber 1990 aufgezeigt, siehe Abbildung 6-10. Werden Landnutzungsänderungen, Kohlenstoffsinken und die von Deutschland verursachten internationalen Verkehre berücksichtigt, so können nur die ambitionierten Szenarien GreenLife und GreenSupreme aufgrund einer nachhaltigen land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung und der damit verbundenen natürlichen Senken Netto-Null-Emissionen sicher erreichen. GreenLate kann diesem Anspruch nahe kommen, siehe Tabelle 6-2. Im Kontext der globalen Herausforderungen und internationalen Verpflichtungen wird jedoch deutlich, dass GreenLate ebenso wie die aktuellen Ziele der Bundesregierung weit entfernt von einem hinreichenden Beitrag für die Begrenzung des globalen Temperaturanstieges auf deutlich unter 2 °C liegen. Auch das hohe Ambitionsniveau in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife genügt nicht den Anforderungen, den globalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C zu begrenzen. Mit einem Transformationspfad wie in Green-Supreme kann allerdings diesen Anforderungen Rechnung getragen und ein angemessener Beitrag Deutschlands geleistet werden.

Der Primärrohstoffkonsum (RMC) kann in den Green-Szenarien bis 2050 um bis zu 70 % reduziert werden. Das ist möglich durch eine Kombination von Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen, Lebensstiländerungen und dem Verzicht auf fossile Energieträger und Rohstoffe. Dies entspricht einem Konsum von Rohstoffen von rund 5,7 t RMC pro Kopf in 2050. Mit einer jahresdurchschnittlichen Steigerung von 2,3 % bis 3,0 % der Gesamtrohstoffproduktivität über alle Szenarien hinweg, ist die Entwicklung deutlich über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRess II (BMUB, 2016) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung, 2018a). Hintergrund ist auch der steigende Anteil an stofflich genutzten Sekundärrohstoffen am Gesamtmaterialekonsum in RME. Dieser erhöht sich in allen Szenarien im Zeitverlauf von aktuell 10 % auf 27 % (GreenLate) bis 38 % (GreenSupreme) in 2050. Die Green-Szenarien zeigen, dass bei der Umsetzung ambitionierter Recyclingvorgaben, ein sehr viel höheres Maß an Kreislaufführung erreicht werden kann. Während die Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, innerhalb des aktuell diskutierten Korridors einer umweltgerechten Rohstoffinanspruchnahme liegen, zeigt die Betrachtung von für die Transformation relevanten Einzelrohstoffen, dass lediglich GreenSupreme langfristig die Chance einer global gerechten Rohstoffnutzung aufweist und zumindest zeitweise mögliche Rohstoffverknappungen gemildert werden können.

**Es wird damit deutlich, dass für einen angemessenen Beitrag Deutschlands zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C und eine global gerechte Rohstoffnutzung große nationale Anstrengungen entsprechend dem GreenSupreme-Szenario nötig sind.**

Um dies erfolgreich zu gestalten sind in ausgewogener Balance folgende drei grundsätzliche Strategien zum Klima- und Ressourcenschutz zu verfolgen:

- ▶ Substitution: Ersetzen von treibhausgas- und ressourcenintensiven Techniken und Produkten durch treibhausgasneutrale oder treibhausgasarme und ressourcenschonende Alternativen.
- ▶ Vermeidung: Durch Effizienz, Suffizienz und Konsistenz reduzierter Verbrauch von Produkten/Aktivitäten, die zu geringeren Treibhausgasemissionen und niedrigerer Primärrohstoffinanspruchnahme und Ressourcenbeanspruchung führen.
- ▶ Senken: Die Entnahme von bereits emittiertem CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre durch Kohlenstoffsinken (CDR) zur Treibhausgasminderung.
- ▶ Diese Strategien wurden in den Green-Szenarien im unterschiedlichen Ausmaß und Handlungsfeld spezifisch unterstellt.

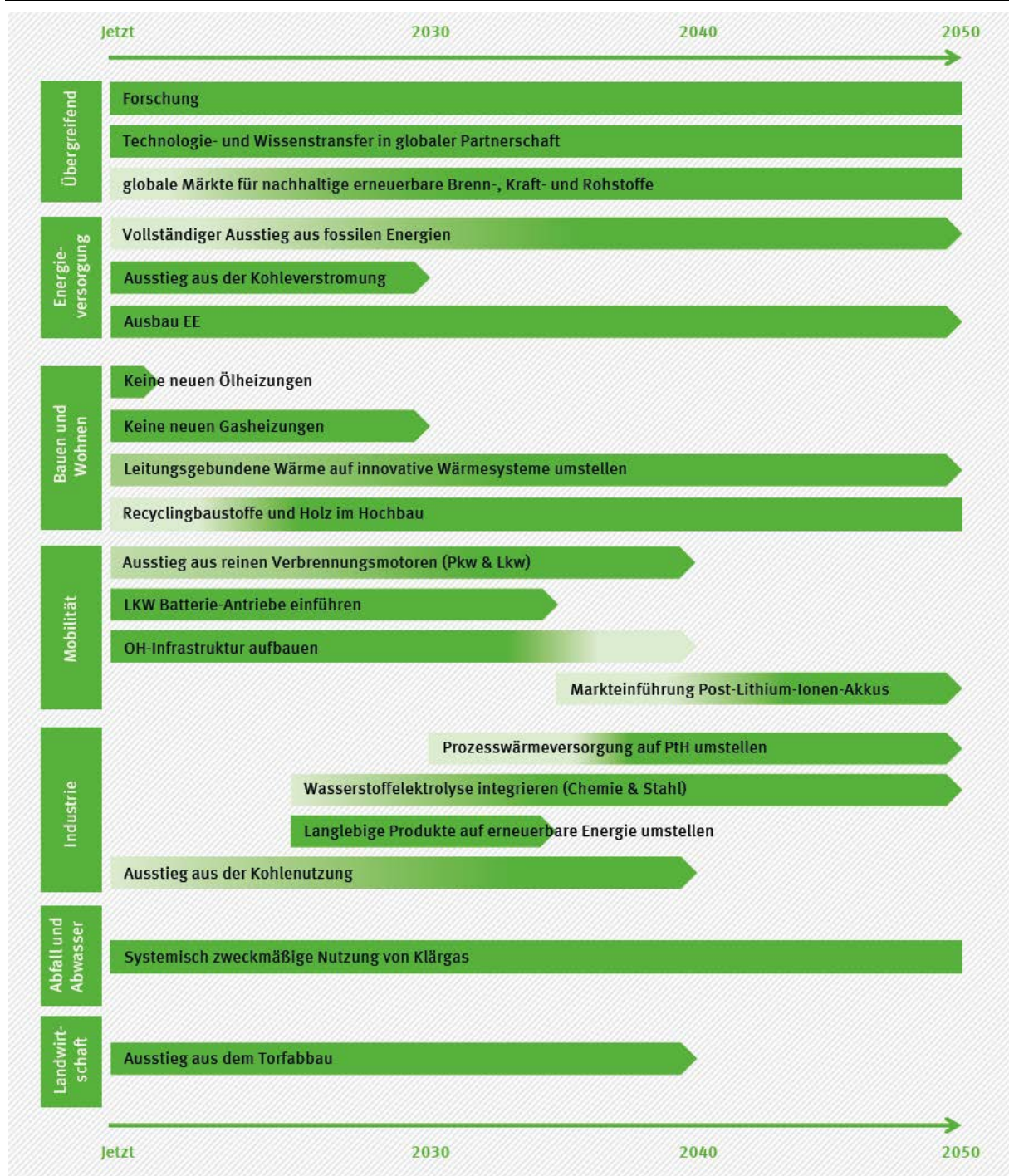
Daneben bedarf es übergreifender Maßnahmen, die eine volkswirtschaftlich kostengünstige, ressourcenschonende Treibhausgasneutralität sicherstellen. Diese Studie enthält zwar keine Vorschläge zur konkreten Umsetzung dieses übergreifenden Handlungsbedarfes, sie verdeutlicht aber die sektoral erforderlichen Schritte, die in passende übergreifende Maßnahmen eingebettet sein müssen, um einer global gerechten, nachhaltigen Entwicklung in Deutschland nahezukommen. Ökonomische Instrumente, wie CO<sub>2</sub>-Bepreisung und die umfassende Internalisierung von Umweltkosten, der Abbau umweltschädlicher Subventionen und Förderungen, sind für technische und soziale Innovationen, für Investitionen in Infrastrukturen, für Standortentscheidungen der Wirtschaft sowie für den individuellen Energiekonsum richtungsweisend. Dabei vermeidet eine langfristig orientierte Politik

Strukturbrüche und schafft durch klare gesetzliche Regelungen langfristige Planbarkeit bei allen Akteuren der Gesellschaft.

Unbenommen ist dabei auch, dass ein globales, gemeinschaftliches Verständnis für Klima- und Ressourcenschutz schnell entwickelt werden muss. Nur wenn globale Treibhausgasneutralität bis spätestens 2050 in Verbindung mit der Schonung der natürlichen Ressourcen angestrebt wird, können Klima- und Ressourcenschutz erfolgreich sein und die nationalen Maßnahmen und Investitionen in Deutschland volkswirtschaftlich sinnvoll durchgeführt werden. Hierfür ist auch global die zügige Einführung treibhausgasneutraler und rohstoffsparender Techniken, Produktionen und Produkte durch beschleunigte technische Entwicklung und internationalen Technologietransfer notwendig.

#### 7.1.1 Substitution

Durch Substitution von treibhausgas- und ressourcenintensiven Prozessen und Produkten kann ein sehr hoher Minderungsbeitrag geleistet werden. Sie ist im Wesentlichen durch technische Maßnahmen geprägt. Darunter ist bspw. die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien zur Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung zu verstehen. Hier sind sowohl die erforderlichen Investitionen als auch die teilweise noch notwendigen Forschungen und Weiterentwicklung von erneuerbaren Techniken übergreifend zu gewährleisten. Auch können durch Forschung und Weiterentwicklung treibhausgasarme Prozesstechniken und Produkte entwickelt werden, wie bspw. alternative Betone. Grundsätzlich besteht aber auch hier die Herausforderung, dass verspätetes Handeln das Potential des Minderungsbeitrags zur Treibhausgasneutralität senkt. So sind frühzeitig **Forschungs- und Entwicklungsbedarfe** zu initiieren, die notwendigen Infrastrukturen müssen ausgebaut werden, rechtzeitig muss der erforderliche Ausbau der erneuerbaren Energien gestaltet und erforderliche Investitionen in allen Bereichen getätigt werden, um einen möglichst hohen Minderungsbeitrag dieser Strategie bis 2050 gewährleisten zu können. Um die notwendigen schnellen technischen Fortschritte und sehr ambitionierten Transformationsschritte auch außerhalb Europas zu befördern, sind **globale Partnerschaften für einen Wissens- und Technologietransfer** erforderlich. Die weiteren den Szenario GreenSupreme zugrundeliegenden Handlungsoptionen sind in Abbildung 7-1 dargestellt.

**Abbildung 7-1: Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Strategie „Substitution“**

Hinweis: Die jeweiligen Pfeile verdeutlichen den Zeitraum der Handlungsempfehlung. Die Schattierungen symbolisieren die Dringlichkeit zur Umsetzung. Das Ende der jeweiligen Pfeile charakterisiert die erfolgreiche und abgeschlossene Umsetzung der Handlungsempfehlung.

Quelle: eigene Darstellung

Der vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische und nicht-energetische Anwendungen ist sowohl aus Klima- als auch aus Ressourcenschutzperspektive unausweichlich. Ein Festhalten an fossilen Energien führt dauerhaft zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre und dauerhaft steigender Primärrohstoffanspruchnahme. Damit schnell ein hoher Beitrag zur Treibhausgasminderung in der Energieversorgung geleistet werden kann, sind der Ausstieg aus der Kohleverstromung



bis 2030 und der Ausstieg aus der Kohlenutzung bis 2040 notwendig und sozial verträgliche Übergänge zu gestalten. Dies muss einhergehen mit einem ambitionierten Ausbau der erneuerbaren Energien. Der jährliche Bruttozubau von Windenergie an Land ist auf mindestens 4 GW pro Jahr und vorzugsweise auf 5,5 GW pro Jahr zu erhöhen. Photovoltaik sollte auf mindestens 3,5 GW pro Jahr und vorzugsweise auf 4,8 GW pro Jahr ausgebaut werden.

In Folge einer globalen Übereinkunft, ressourcenschonende Treibhausgasneutralität bis 2050 zu erreichen, werden sich auch **globale Strukturen für einen erneuerbaren Energiemarkt zur nachhaltigen Versorgung mit Brenn-, Kraft- und Rohstoffen** entwickeln. Damit wird die Substitution fossiler Energien in allen Anwendungsbereichen, die technisch nicht auf direkte Nutzung von erneuerbarem Strom erfolgen kann, gewährleistet. Ergänzend kann aus dem Bereich **Abfall und Abwasser** ein effektiver Beitrag durch die flexible sektorunabhängige Nutzung der erneuerbaren Ressource Klärgas und biogenen Reststoffen geleistet werden.

In den Anwendungsbereichen gilt es, fossile konventionelle Techniken dort wo technisch möglich durch effiziente erneuerbare Techniken auf Basis der direkten Stromnutzung zu ersetzen. Im Bereich **Bauen und Wohnen** bedeutet dies, ergänzend zu den oben genannten Vermeidungsstrategien, dass nach 2020 keine neuen Ölheizungen und spätestens nach 2030 keine neuen Gasheizungen installiert werden. Vielmehr sind erneuerbare Energien, bspw. Mittels Wärmepumpen, zu nutzen. Die leitungsgebundene Wärme sollte auf innovative Wärmesysteme mit hohen erneuerbaren Wärmeanteilen, die nicht brennstoffbasiert sind, umgestellt werden. Um sowohl die Treibhausgasemissionen der Baustoffherstellung als auch den Primärrohstoffkonsum zu verringern, sind der hochwertige Einsatz von Recyclingbaustoffen insbesondere auch im Hochbau, sowie der Einsatz nachhaltig produzierter nachwachsender Rohstoffe, insbesondere Holz, konsequent zu fördern. Hierfür gilt es auch, bestehende Hemmnisse zu beseitigen und die entsprechenden gesetzlichen Voraussetzungen zu schaffen.

Elektromobilität ist der zentrale Baustein einer Energiewende im **Verkehr**. Nur in Verkehrsträgern, die nach heutigem Kenntnisstand die direkte und ausschließliche Nutzung von erneuerbarem Strom zur Deckung der Mobilitätsbedarfe technisch nicht ermöglichen, sollten treibhausgasneutrale Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Für hohe Minderungen der THG-Emissionen ist eine sehr schnelle Marktdurchdringung mit E-Pkw notwendig, und spätestens ab 2040 sollten nur noch E-Pkw und E-LNF neu zugelassen werden. Im straßengebundenen Güterverkehr sind batterie-elektrische Antriebe, OH- und bevOH-Lkw schnell einzuführen sowie die erforderlichen Infrastrukturen schnellstmöglich zu schaffen. Um sowohl relevante Rohstoffverknappungen zu vermeiden, als auch Rohstoffimporte aus derzeit bekannten Konfliktgebieten zu verringern, ist die Forschung an rohstoffsparenden Post-Lithium-Ionen-Akkumulatoren zu intensivieren, um deren Markteinführung ab 2035 zu ermöglichen.

Auch in der **Industrie** stellt die Substitutionsstrategie den zentralen Baustein dar. Dabei sollte - soweit technisch möglich, die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom (z. B. zur Prozesswärmeerzeugung) erfolgen. Erneuerbare Brennstoffe sollten nur dort zum Einsatz kommen, wo Strom aus technischen Gründen nicht genutzt werden kann (z. B. zur Erhitzung fester, schlecht wärmeleitender Einsatzstoffe). Die fossile Wasserstoffwirtschaft in Deutschland, ggf. mit einem zeitnahen Fokus auf die Petrochemie, sollte ab 2030 auf erneuerbare Energien durch Integration von Wasserstoffelektrolyse umstrukturiert werden. Neben dem vollständigen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische Nutzung muss auch der Ausstieg in den nicht-energetisch industriellen Anwendungen von fossilen Energieträgern gelingen. So ist der Rohstoffbedarf der Chemieindustrie (organischen Chemie) spätestens 2050 vollständig durch erneuerbare Energien (PtG/PtL) zu decken. Vor dem Hintergrund der Langlebigkeit und erhöhter Recyclingraten sind langlebige Produkte bereits ab 2030 durch erneuerbare Energieträger in der chemischen Industrie zu substituieren.

In der **Landwirtschaft** ist durch den Einsatz von Substraten mit Torfersatzstoffen wie Rindenkompost, Holzfasern oder Grünkompost der Verzicht auf Torf umsetzbar und sollte bis spätestens 2040 auch im Erwerbsgartenbau erfolgen. Damit werden weitere Emissionen aus der Degradierung von Mooren vermieden und kann zusätzlich Synergie zur Strategie der Senken gehoben werden, da die vorhandenen Moore als Senken erhalten bleiben.

Einzig mit Substitution als Minderungsstrategie ist jedoch Treibhausgasneutralität nicht erreichbar. In der Industrie verbleiben nach heutigem Kenntnisstand rohstofflich bedingte Treibhausgasemissionen, bspw. aus der Glas- oder Zementindustrie. Genauso verbleiben Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft und durch Landnutzungsänderungen, die nicht durch die Strategie der Substitution vermieden werden können. Vor diesem Hintergrund ist immer eine Kombination der drei Strategien Substitution, Vermeidung und Senken erforderlich.

### 7.1.2 Vermeidung

Jeder Einzelne generiert über Bedürfnisse und Konsumverhalten in Freizeit, Wohnen, Kommunikation, Mobilität und Ernährung entsprechende Nachfragen, welche wiederum auf die Entwicklung der verschiedenen Produktions- und Dienstleistungsbereiche wirken. Die Strategie der Vermeidung greift an beiden Enden dieser Wechselwirkungen an und umfasst sowohl Maßnahmen auf der Angebotsseite als auch auf der Nachfrageseite. Durch ein nachhaltiges Handeln kann die Nachfrage nach treibhausgasverursachenden und ressourcenintensiven Produkten bewußt reduziert werden. Gleichfalls kann durch die Bereitstellung, langlebiger, ressourcenschonender Produkte die Nachfrage nach neuen Produkten entsprechend verändert werden.

Die Ansätze zur Vermeidung und zur Veränderung der Nachfrage basieren vor allem auf dem gesellschaftlichen Wandel und dem nachhaltigen Handeln jedes Einzelnen, unterstützt durch planerische<sup>166</sup> sowie regulatorische<sup>167</sup> Maßnahmen. Hierfür ist mittel- und langfristig vorausschauendes Handeln erforderlich. Werden Minderungsmaßnahmen zu spät ergriffen, kann das Potential dieser Strategie bis 2050 nicht mehr voll ausgeschöpft werden, und der mögliche Beitrag zur Treibhausgasneutralität verringert sich.

Die sich aus dem Szenario GreenSupreme ergebenden Handlungsempfehlungen zur Vermeidung in den einzelnen Bereichen sind in Abbildung 7-2 dargestellt. Neben bewussten Entscheidungen zur Reduktion der Nachfrage ist über alle Bereiche hinweg eine Steigerung der Energieeffizienz erforderlich, um den Bedarf an Energie zu senken. Dies betrifft sowohl technische Geräte im Alltag, wie den Stand-by-Betrieb, effizienten Energietechniken, wie bspw. Motoren und Pumpen, Antriebstechniken der Fahr- und Flugzeuge bis hin zur Prozessoptimierung und Energiemanagement in der industriellen Produktion. Im Transformationspfad kann so ein entscheidender Beitrag zur Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen geleistet werden. Mittel- und langfristig wird durch einen reduzierten Bedarf die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energie erleichtert, da weniger installierte Leistungen und damit verbunden weniger Rohstoffe und Ressourcen in Anspruch genommen werden müssen. Gleichwertig sind die Materialeffizienz und das Recycling zu steigern. Dies betrifft häufig das produzierende Gewerbe, in dem durch materialeffiziente Produktionsprozesse, wie effizientes Stanzen, Biegen und Walzen oder innovative Säge- und Frästechniken, Materialverluste und der Energieeinsatz verringert werden können. Durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen, wie Schrott oder Recyclingbaustoffen können zudem Primärrohstoffe eingespart werden und damit auch die zu ihrer Gewinnung notwendige Energie. Einhergehend ist vor dem Hintergrund der Energie- und

---

<sup>166</sup> Bspw. Stadt der kurzen Wege.

<sup>167</sup> Bspw. Öko-Design-Richtlinie.

Materialeffizienz die Integration der Sektorkopplungstechniken (Power to Heat, Power to Gas, Power to Liquid, etc.) effizient zu gestalten. So hat überall, wo technisch möglich, eine Umstellung auf erneuerbare strombasierte Techniken zu erfolgen. Im Bereich Mobilität ist forciert die Elektromobilität, im Bereich Raumwärme PtH mit Wärmepumpen und zur Prozesswärmeversorgung der Industrie PtH zu integrieren. Ein Festhalten an den konventionellen Techniken, etwa Gasheizungen mit PtG zur Wärmebereitstellung, ermöglicht zwar eine treibhausgasneutrale Versorgung, führt dauerhaft jedoch zu einem größeren Ausbau an erneuerbaren Energien und damit einer höheren Ressourceninanspruchnahme. Ergänzend sind die Strategien zur Vermeidung übergreifend durch Forschung und technische Weiterentwicklungen zu unterstützen.

**Abbildung 7-2: Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Strategie „Vermeidung“**

Hinweis: Die jeweiligen Pfeile verdeutlichen den Zeitraum der Handlungsempfehlung. Die Schattierungen symbolisieren die Dringlichkeit zur Umsetzung. Das Ende der jeweiligen Pfeile charakterisiert die erfolgreiche und abgeschlossene Umsetzung der Handlungsempfehlung.

Quelle: eigene Darstellung

Im Bereich **Bauen und Wohnen** müssen bereits heute die Anforderungen an Neubau, Sanierungen und Modernisierungen weitestgehend den Anforderungen des Gebäudebestands im Jahr 2050 genügen. Dementsprechend sind regulatorisch entsprechend hohe Sanierungstiefen anzureizen und dauerhaft zu gewährleisten. Die Sanierungsrate ist schnell auf mindestens das Zweieinhalbfache des heutigen Niveaus von 1 % zu erhöhen. Damit können im erheblichen Umfang die Energiebedarfe gesenkt werden und der dringend erforderliche Beitrag zur Treibhausgasminimierung im Transformationspfad aus diesem Bereich und der langfristige Beitrag zur Senkung des Primärrohstoffkonsums geleistet werden. Flächensparendes Bauen und gesteigerte Innenentwicklung, zum Beispiel durch einen hohen Anteil an Geschosswohnungsbau



und Errichtung von Wohngebäuden in modularer Bauweise, ermöglichen eine Reduktion des Wohnflächenbedarfs und den damit verbundenen Energie- und Rohstoffbedarf. In Verbindung mit weiteren Instrumenten, wie dem Flächenrecycling kann bis 2050 die Flächenneuinanspruchnahme auf Netto-Null reduziert werden.

**Verkehrsvermeidung** und die Verlagerung auf den Umweltverbund spielen im Personenverkehr eine zentrale Rolle. Um dies zu erreichen, sind sowohl eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung fossiler Kraftstoffe einzuführen und umweltschädliche Subventionen abzubauen (z. B. Dieselsteuer- und Dienstwagenprivileg, Pendlerpauschale), als auch Anreize zu schaffen, um Wegstrecken zu reduzieren und mehr Wege mit dem Umweltverbund zurücklegen zu können. Gleichzeitig müssen die Angebote und Infrastrukturen der öffentlichen Verkehrsmittel massiv ausgebaut werden. Im Güterverkehr sollte die Verlagerung auf Schiene und Binnenschiff gefördert werden. Durch veränderte ökonomische Rahmenbedingungen im Luftverkehr und den Ausbau des Schienennetzes, um die Erreichbarkeit der Ballungszentren zu verbessern, sind innerdeutsche Flüge vollständig zu vermeiden. Auch internationale Flüge sind vor dem Hintergrund der klimawirksamen Nicht-CO<sub>2</sub>-Effekte<sup>168</sup> und dem enormen Bedarfen an erneuerbaren PtL-Flugkraftstoffen und damit verbundenem Ressourcenbedarf auf ein volkswirtschaftlich nachhaltiges Niveau zu begrenzen.

In der **Industrie** ist durch Energiemanagement, Optimierung von Verfahren und Prozessen sowie eine konsequente sektorübergreifende Abwärmenutzung und der diesbezüglichen Forschung und Weiterentwicklung ein Beitrag zur Energieeffizienz zu leisten. Im Fokus der industriellen Produktion und Produktentwicklung sollte dabei insgesamt ein materialeffizienter Umgang stehen, beim Produktdesign sind auf lange Produktlebensdauern und auf Reparaturfähigkeit zu achten. Weiter ist ergänzend zur Umstellung auf erneuerbare Energien (Substitution, siehe Abbildung 7-1) ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umzubauen und weiterzuentwickeln, so dass auch rohstoffbedingte Treibhausgasemissionen gemindert werden. Diese müssen schnell bis zur Anwendungsreife im großindustriellen Maßstab gebracht werden. Bei Anlagen mit langen Nutzungszeiten (z. B. Hochöfen) sollte spätestens ab 2030 der Umbau erfolgen. Alternative treibhausgasarme oder -neutrale Produkte zur Substitution von Produkten, die durch ihre Produktionsprozesse unweigerlich mit dem Freisetzen von Treibhausgasemissionen verbunden sind (bspw. Zementproduktion), müssen entwickelt, zur Marktreife geführt und integriert werden.

Im Bereich **Abfall und Abwasser** können insbesondere durch eine Erhöhung des Rezyklings und damit des Vermeidens des Einsatzes von Primärrohstoffen Treibhausgasemissionen vermieden werden. Durch gesteigerte Materialeffizienz und umweltbewussteren Umgang bei Verpackungen und Papierverbrauch u.ä. kann ein wichtiger Beitrag zur Abfallvermeidung gewährleistet werden. Darüber leistet auch hier die gesündere fleischärmere Ernährung mit reduzierter tierischer Proteinzufuhr über eine dadurch veränderte Abwasserzusammensetzung und eine in der Folge verminderte Emission von Treibhausgasen wie z. B. Lachgas aus der Abwasserreinigung einen Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen.

Durch die vollständige Umsetzung technischer Minderungsmaßnahmen in der **Landwirtschaft**, insbesondere durch Steigerung der Stickstoffeffizienz und ein verbessertes Wirtschaftsdüngermanagement, können schon kurzfristig große Treibhausgasminderungen erreicht werden. Diese Maßnahmen sollten daher schnell und umfassend umgesetzt werden. Daneben stellt eine gesunde Ernährung durch verringerten Konsum tierischer Produkte in Verbindung mit der Reduktion der Tierbestände eine sehr effiziente Maßnahme zur

---

<sup>168</sup> Diese entstehen auch beim Einsatz von nachhaltigen treibhausgasneutralen PtL-Flugtreibstoffen.

Treibhausgasemissionsminderung dar. Entsprechende Konsumänderungen und die notwendigen Umstellungen der landwirtschaftlichen Produktion werden nur über einen längeren Zeitraum realisierbar sein. Umso wichtiger ist es jedoch, bereits heute entsprechende Maßnahmen zu initiieren und umzusetzen.

### 7.1.3 Senken

Die Strategie der Senken adressiert im Wesentlichen den Klimaschutz, tangiert dabei jedoch den Ressourcenschutz und kann Synergien zu anderen Umweltaspekten heben. Senken stellen eine weitere Option zur Beeinflussung der Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre durch die Entnahme von Kohlendioxid (CDR – Carbon Dioxide Removal) dar. Im IPCC 1.5-Grad-Sonderbericht beinhalten alle zu Grunde liegenden Szenarien, die eine Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5°C darstellen, den Einsatz von Senken. Festzuhalten ist, dass mindestens die THG-Emissionen, die sich nicht durch die beiden vorgehenden Minderungsstrategien vermeiden lassen, durch zusätzliche Maßnahmen der Atmosphäre wieder entzogen werden müssen. Die Erschließung von Senken ist daher eine notwendige Ergänzung zur Vermeidung und Substitution. Gleichwohl sind CDR-Maßnahmen jedoch physikalisch in ihrer Kapazität begrenzt. Viele der derzeit diskutierten technischen CDR-Maßnahmen mit anschließender Speicherung, wie Meeresdüngung, BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) usw., bergen nach dem heutigen Wissensstand potentielle Risiken für Umwelt und eine nachhaltige Entwicklung (UBA, 2019a). Die Stärkung natürlicher Kohlenstoffsinken bietet hingegen schon heute die Möglichkeit einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre. Auch diese sind begrenzt, aber national in relevanter und global in signifikanter Menge möglich. Senken sind also kein Ersatz für Vermeidung und Substitution von Treibhausgasemissionen. Je schneller über die ersten beiden Strategien Treibhausgasemissionen reduziert werden, desto geringer sind die mit CDR-Maßnahmen verbundenen Zielkonflikte und Risiken.

Die sich aus dem Szenario GreenSupreme ergebenden Handlungsempfehlungen für die Senken sind in Abbildung 7-3 dargestellt.

**Abbildung 7-3: Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Strategie „Senken“**



Hinweis: Die jeweiligen Pfeile verdeutlichen den Zeitraum der Handlungsempfehlung. Das Ende der jeweiligen Pfeile charakterisiert die erfolgreiche und abgeschlossene Umsetzung der Handlungsempfehlung.

Quelle: eigene Darstellung

Die Potenziale für eine nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse sind begrenzt. Durch den **Verzicht auf die Nutzung von Anbaubiomasse** und energetische Nutzung von Waldrestholz in allen Sektoren (Verkehr, Industrie und privaten Haushalten) kann ein Beitrag zur Entwicklung natürlicher Kohlenstoffsinken in Deutschland geleistet und Synergien zum Umweltschutz gehoben werden. Durch den Verzicht auf Anbaubiomasse können Flächen anderweitig im Sinne der Senkenstärkung genutzt werden. Der **Aussteig aus der energetischen Waldrestholznutzung** bietet einerseits potenzielle Möglichkeiten zum weiteren Ausbau der stofflichen Holznutzung, z. B. als Rohstoff für holzbasierte Dämmstoffe, und somit zur Ausweitung des Holzproduktspeichers. Andererseits führt der Verbleib des Waldrestholzes im Wald zu einer Anreicherung der Totholzvorräte und damit auch zur Erhöhung des Kohlenstoffspeichers im Boden. Zusätzlich kann so auch ein wichtiger Beitrag zum Biodiversitätsschutz geleistet werden. Gleichzeitig werden durch den Verzicht auf dezentrale Biomassenutzung die meist hohen lokalen Emissionen von Feinstaub und anderen Luftschadstoffen gemindert.

Sowohl der **Ausbau des Holzproduktspeichers** durch die nachhaltige Steigerung der Holznutzung in langlebigen Produkten (z. B. Hausbau, hochwertige Möbel) als auch die Sicherung und Erhöhung des Waldspeichers durch eine **nachhaltige Waldbewirtschaftung**, sowohl nationale wie auch international, sind als Senken für die Erreichung der Treibhausgasneutralität von besonderer Bedeutung. Vor dem Hintergrund der zunehmenden durch den Klimawandel bedingten Schäden im Wald sollte der **Waldumbau** hin zu stabilen, naturnahen Mischbeständen aktiv vorangebracht werden, um die für Deutschland wichtige Kohlenstoffsinkende Wald zu erhalten und zu stabilisieren.

Außerhalb des Waldes stellt die **Wiedervernässung von Mooren** eine der wirksamsten Maßnahme zur Sicherung und Stärkung der natürlichen Senken dar. Durch den Verzicht auf die energetische Nutzung von Anbaubiomasse und einer Reduktion der Teirbestände stehen hierfür ausreichend Flächen zur Verfügung.

## 7.2 Weiterer Forschungsbedarf

Mit den Green-Szenarien wurden in einer systemischen Vorgehensweise ambitionierter Klima- und Ressourcenschutz über alle Anwendungsbereiche hinweg gemeinsam betrachtet (vgl. Kapitel 5) und die damit sich ergebenden Wirkungen auf Rohstoffinanspruchnahme und Treibhausgasemissionen bewertet sowie die erkennbaren Wechselwirkungen analysiert (vgl. Kapitel 6). Die systemischen Betrachtungen der RESCUE-Studie ermöglichen bereits vielfältige Erkenntnisse zum Nexus von Klima- und Ressourcenschutz (Kapitel 7.2). Andererseits konnten in der vorliegenden Untersuchung, u. a. aufgrund der sich ergebenden Komplexität (vgl. Kapitel 3) relevante Aspekte nicht berücksichtigt werden. Auch vor dem Hintergrund noch offener methodischer Fragen und fehlender Datengrundlage war es erforderlich, wichtige Aspekte und Perspektiven auszuklammern. Diese sollen nachfolgend kurz umrissen werden.

Wie die Wetterextreme der letzten Jahre eindrücklich gezeigt haben, sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Land- und Forstwirtschaft, die globalen Lieferketten und die Infrastruktur sowie der sich daraus ergebende Anpassungsbedarf dringende und zunehmend relevante Aspekte des Nexus von Klima- und Ressourcenschutz, insbesondere in der langfristigen Perspektive der vorliegenden Studie. Dennoch konnten diese nur vereinzelt Berücksichtigung finden, beispielsweise im Bereich Bauen und Wohnen bei der Raumwärme und Klimatisierung. Darüber hinaus gehende Betrachtungen, wie Auswirkungen auf Ernteerträge, den unterstellten Waldumbau u. a. erfordern häufig komplexe Klima-Ökosystem-Modellberechnungen, die im Rahmen der hier gezeigten Arbeiten nicht möglich waren und Gegenstand zukünftiger Forschung sein sollten.

Wenngleich – auch vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen – die Frage der Kosten und der sozioökonomischen Wechselwirkungen der Transformation zur Treibhausgasneutralität hoch relevant ist, konnte eine ökonomische Bewertung der untersuchten Wege im Rahmen der Studie nicht erfolgen. Zwar wurde die Energieversorgung mit einer Kostenoptimierung modelliert, es konnten jedoch nicht über alle Emissionsquellgruppen hinweg Kosten dargestellt werden. Dies ist unter anderem darin begründet, dass in fast allen Sektoren im Laufe der Transformation der Einsatz neuer Techniken unterstellt wird. Diese sind zwar bereits hinsichtlich ihrer technischen Umsetzbarkeit untersucht, eine valide Kostenschätzung liegt aber zumeist noch nicht vor. Auch sind darüberhinausgehende Vermeidungskosten häufig nicht bekannt und konnten nicht einbezogen werden. Ebenso kann nach aktuellem Kenntnisstand die Rohstoffpreisentwicklung nicht belastbar über einen Zeitraum von 30 Jahren prognostiziert werden. Hier besteht daher vor allem methodischer Forschungsbedarf, um die Kosten der Transformation richtungssicher abschätzen zu können. Darüber hinaus gilt es aber auch, in zukünftigen Untersuchungen Ansätze, Maßnahmen, Instrumente und Policy Mixe zu entwickeln, wie der notwendige Strukturwandel in den verschiedenen Bereichen und wie die gesamtgesellschaftlichen Anstrengungen umweltgerecht, sozialverträglich und wirtschaftlich gestaltet werden können. Zentral ist es auch, deren Wirkung und Zusammenwirken zu analysieren und kriteriengestützt zu bewerten, um daraus Schlussfolgerungen zur weiteren Ausgestaltung des Policy Mix und den zentralen Instrumenten ziehen zu können. Hierbei gilt es auch, den Betrachtungsraum über die Grenzen Deutschlands hinaus zu erweitern, um sowohl globale Wirkungen der Transformation zu adressieren, als auch Möglichkeiten der globalen Übertragbarkeit auszuloten sowie Fragen der globalen Gerechtigkeit zu beantworten. Zu einzelnen dieser Aspekte hat das Umweltbundesamt bereits weitere Forschungsprojekte initiiert; es besteht jedoch weiterhin hoher Forschungsbedarf zur Bewertung der sozioökonomischen Wirkungen und zum Policy Mix.

Neben dem Bedarf für weitere Analysen und Untersuchungen zu den unterschiedlichen Wirkungen und zur Entwicklung von Ansätzen zur Vermeidung oder Abmilderung negativer Effekte, zeigt die Studie auch den Bedarf an anwendungsorientierter Forschung und Entwicklung. Dies betrifft vor allem die Umstellung von Prozessen und Prozessschritten der industriellen Produktion in den energieintensiven Branchen auf strombasierte Verfahren und dort, wo dies technisch nicht möglich ist, auf den Einsatz von erneuerbarem Gas (vgl. Kapitel 5.5).

Vor dem Hintergrund der Fragen zur zeitgerechten Rohstoffverfügbarkeit und globalen Übertragbarkeit besteht aus Sicht des Umweltbundesamts noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf für rohstoffeffiziente Produktionsverfahren und Produkte, z. B. durch Recyclingverfahren und Substitution. So gilt es, Potentiale des Recyclings von für Umwelttechnologien notwendigen, aber aus Umwelt- und Versorgungssicht kritischen Rohstoffen zu untersuchen (beispielsweise von Lithium aus Second-Life-Batterien) oder rohstoffsparende Energieerzeugungsanlagen zu entwickeln. Auch im Bereich des nachhaltigen Bauens besteht weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf, z. B. zum verstärkten Einsatz von Recyclingbaustoffen oder zum Bauen in Holzbauweise. Eng damit verbunden ist auch die Frage des zukünftigen Einsatzes von Laubhölzern im Bausektor. Auch hier ist es notwendig die Umsetzung der anwendungsorientierten Forschung im Anschluss gezielt mit flankierenden Maßnahmen, Instrumente und Policy Mixe zu begleiten. Auch hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Gleichfalls konnten Fragen zur konkreten Ausgestaltung der Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungen und Verkehr, der Systemresilienz und insbesondere weiterer Umweltwirkungen, auch im Ausland, nur am Rande betrachtet werden. Diese Aspekte werden



zwar teilweise bereits durch aktuelle Forschungsprojekte des Umweltbundesamtes untersucht, sollten aber ebenso Grundlage weiterer Studien, auch anderer Institutionen und Akteure, sein.

### 7.3 Fazit

**Die RESCUE-Studie zeigt, dass Deutschland bis 2050 noch verschiedene Wege hin zur Treibhausgasneutralität offen stehen, ohne den Einsatz von technischen Senken zu benötigen.** Es wird auch deutlich, dass im Kontext der globalen Herausforderungen und internationalen Verpflichtungen die derzeitigen Klimaschutzziele und Maßnahmenprogramme der Bundesregierung nicht ausreichend sind. Mit einem Transformationspfad wie in GreenSupreme kann diesen Anforderungen einer nachhaltigen Treibhausgasneutralität bei annähernd global gerechter Rohstoffinanspruchnahme Rechnung getragen werden.

**Um bis 2050 Treibhausgasneutralität zu erreichen, müssen global und national die richtigen Weichen sehr schnell, d. h. bereits in den nächsten Jahren gestellt werden.** Andernfalls wird ein Punkt überschritten, jenseits dessen das Ziel einer Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2050 nicht mehr rechtzeitig erreicht werden kann. Je früher und ambitionierter gehandelt wird, desto mehr Freiräume eröffnen sich für die Gestaltung der Transformationspfade hin zur Treibhausgasneutralität und desto höher sind die Synergien zur Erreichung anderer Umweltziele. Um eine ausgewogene Balance zwischen den Strategien Substitution, Vermeidung und Senken im Klima- und Ressourcenschutz zu gewährleisten, besteht dringender Handlungsbedarf.

**Für eine Entwicklung, die sich am Übereinkommen von Paris orientiert, sind die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 in der Größenordnung von rund 70 % zu mindern.** Geringe Verschärfungen der kurzfristigen Treibhausgasminderungsziele (2030) in Deutschland haben nur ungenügende Wirkung, um den nationalen Beitrag zu den globalen Herausforderungen der Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C gerecht zu werden. Die aktuellen Politiken und Zielsetzungen der Bundesregierung sowie der gesellschaftliche Konsens sind davon aber noch weit entfernt. Dabei stellen Klima- und Umweltschutz eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar, welche angefangen mit Aufklärung und Bildung bis hin zu ordnungsrechtlichen Instrumenten umgesetzt werden muss, um erfolgreich gemeistert werden zu können.

Die RESCUE-Studie zeigt, dass die notwendige Transformation zur Treibhausgasneutralität mit einem vergleichsweise geringen Primärrohstoffkonsum in Deutschland in 2050 bei hohem technologischem und Wohlstands-Niveau möglich ist. **Die Studie zeigt auch, dass das Erreichen eines nachhaltigen Niveaus der Primärrohstoffinanspruchnahme innerhalb einer global gerechten Rohstoffnutzung ein vergleichbar ambitioniertes Handeln erfordert, wie zur Erreichung der Treibhausgasneutralität.**

**Um die Wechselwirkungen von Klima- und Ressourcenschutz adäquat adressieren zu können, ist ein übergreifendes, gemeinschaftliches Denken und integriertes Handeln zwingend nötig.** So ist allen Green-Szenarien der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energien in allen Bereichen, also Strom, Brennstoffe, Kraftstoffe und Rohstoffe, gemein. Nur so kann Klima- und Ressourcenschutz nachhaltig gelingen. Der technisch mögliche schnelle Ausstieg aus der Kohleverstromung ist mit großen vorteilhaften Wirkungen bei der Begrenzung der Treibhausgasemissionen und der Rohstoffinanspruchnahme verbunden und daher anzustreben. **Neben der Substitution und Vermeidung von treibhausgasintensiven Prozessen und Produkten ist die Substitution und Vermeidung von materialintensiven Prozessen und Produkten eine gleichrangige Strategie im Klima- und Ressourcenschutz.**

**Der Ausstieg aus der Kohleverstromung sollte bis etwa 2030, der vollständige Ausstieg aus der Kohlenutzung (also auch Wärme und Rohstoff) sollte bis spätestens 2040 erfolgen. Auf die Nutzung aller fossilen Energieträger sollte bis spätestens 2050 verzichtet werden.** Um dies zu ermöglichen, sind in allen Anwendungsbereichen und Bereichen des gesellschaftlichen Miteinanders die richtigen Weichen zu stellen. Die erforderlichen technologischen Entwicklungen zur Substitution und Vermeidung von treibhausgas- und materialintensiven Prozessen und Produkten sind anzugehen und der Ausbau der hierfür erforderlichen Infrastrukturen ist ambitioniert umzusetzen. Insbesondere in der industriellen Produktion bestehen noch erhebliche Forschungsbedarfe, die vor dem Hintergrund der langen Investitionszyklen schnell zu marktreifen Verfahren und deren Integration führen müssen. Im Bereich Gebäude müssen bereits heute neu gebaute Häuser den Anforderungen in 2050 gerecht werden, so dass frühzeitig hohe Energieeffizienzstandards, raumeffizientes Bauen und nachhaltige Materialien um- und eingesetzt werden müssen. Im Bereich Mobilität sind schnell durch Stärkung des Umweltverbundes und des Ausbaus des Schienennetzes die Mobilitätsbedarfe umweltgerecht zu decken. Elektromobilität ist bei nahezu allen Verkehrsträgern zentraler Baustein der Klimaschutzbestrebungen. Hierfür müssen die erforderlichen Infrastrukturen schnell ausgebaut und die Forschung zu ressourcenschonenden, langlebigen und effektiven Batterietechniken angegangen werden.

**Gesellschaftliches Umdenken ist in allen Bereichen erforderlich, um ein umweltbewussteres Handeln sowohl bei der Nachfrage als auch beim Angebot zu generieren.** Hierfür sind politisch die ordnungsrechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen und Voraussetzungen zu schaffen sowie bildungspolitische Maßnahmen zu ergreifen. Der Abbau umweltschädlicher Subventionen ist dringend erforderlich, um den Übergang zu nachhaltigen Produktions- und Konsummustern umzusetzen. Energie- und Materialeffizienzsteigerungen müssen in der industriellen Produktion und in der Nachfrage schnell Einzug finden. Eine gesündere, fleischärmere Ernährung der Bevölkerung entsprechend den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung und der darauf folgenden Reduktion des Tierbestandes ist ein wichtiger aber auch dringend erforderlicher Beitrag zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen, der gehoben werden muss, auch weil sich weitere Synergien zu anderen Umweltherausforderungen ergeben. Inländische Flüge sollten durch attraktive und schnelle Bahnverbindungen vollständig ersetzt werden. Auch die internationalen Flüge sollten deutlich reduziert werden und nicht, wie derzeit prognostiziert, ständig anwachsen. Hierfür ist ein Umdenken im Mobilitäts- und Reiseverhalten erforderlich.

**Für einen erfolgreichen Klimaschutz ist die Nutzung von Senken unausweichlich. Sie stellen jedoch keinen Ersatz für Substitution und Vermeidung dar.** Auch ist die Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre begrenzt, und technische Senken bergen nach dem heutigen Wissensstand potenzielle Risiken für die Umwelt und eine nachhaltige Entwicklung. **Natürliche Senken, also nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung, bieten hingegen schon heute die Möglichkeit einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre. Sie sind daher zeitnah zu stärken,** womit Synergien zu weiteren Herausforderungen in der Umweltpolitik, bspw. der Biodiversitätsschutz, gehoben werden können. Maßnahmen hierfür sind ein aktiver Waldbau hin zu stabilen Mischwäldern, der Ausstieg aus dem Anbau von Biomasse für energetische Zwecke oder die Wiedervernässung der Moore.

Deutlich wird auch, dass für die Umsetzung erhebliche technische Entwicklungen und Innovationen sowie ein gesellschaftlicher Wandel auf allen Ebenen und ein nachhaltigeres Handeln zum Wohlergehen der heutigen und zukünftigen Generationen in den kommenden 30 Jahren erfolgen müssen. **So bedarf es seitens der Politik eines klaren Bekenntnisses zu**

**einer ambitionierten Klima- und Ressourcenschutzpolitik. Es müssen nicht nur ambitionierte Ziele gesetzt werden, sondern es muss der ökonomische, ordnungspolitische und institutionelle Rahmen dafür geschaffen werden, diese sicher zu erreichen.** Dies schließt eine Erfolgskontrolle inklusive Monitoring und Wirkungsabschätzung mit ein. Damit wird Planbarkeit für alle Akteure auf allen gesellschaftlichen Ebenen (Industrie, Gebäudeeigentümer etc.) gewährleistet. **Neben ambitionierten Klimaschutzzielen bedarf es auch konkreter Ziele im Ressourcenschutz, die den steuerungsrelevanten Anforderungen zum Gelingen der Ressourcenwende gerecht werden.** Hierfür ist außerdem ein konsistentes Monitoring unserer Ressourceninanspruchnahme zu implementieren.

Die nationalen und globalen Ziele können jedoch nur erreicht werden, wenn die Politiken auch in entsprechende europäische und internationale Entwicklungen eingebettet sind und sich diese am Übereinkommen von Paris und der Agenda 2030 orientieren. **Dabei sind von Deutschland aus Maßnahmen zu ergreifen, um globale Treibhausgasminderungen durch finanzielle, technologische Hilfen und Wissenstransfer zu unterstützen. Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Schutz und Ausbau der natürlichen Senken sollte dabei im Fokus stehen.** In Deutschland in Verkehr gebrachte Produkte (auch importierte Produkte) sollten hohen Anforderungen an geringen Treibhausgasemissionen inklusive der Vorkette und der Materialeffizienz gerecht werden, um so auch den globalen Wandel zu Klima- und Ressourcenschutz anzureizen.

**Wenngleich aktuelle Trends, politische Entscheidungen und gesellschaftliche Diskussionen die RESCUE-Studie ambitioniert erscheinen lassen, so zeigt sie eindrücklich, dass Klima- und Ressourcenschutz integriert umgesetzt werden müssen und eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität bis 2050 in Deutschland realisierbar ist. Es stellt sich nicht mehr die Frage, ob und wann einzelne Beiträge erbracht werden sollen und Entwicklungen angegangen werden müssen. Vielmehr wird deutlich: Es muss jetzt breit und zielgenau gehandelt werden, um alle derzeit verfügbaren nachhaltigen Optionen zu nutzen! Jeder einzelne Beitrag, sowohl in Produktion als auch Konsum ist wichtig!**

## Quellenverzeichnis

- 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH & TransnetBW GmbH (2019). Netzentwicklungsplan 2030. Download unter: <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/netzentwicklungsplaene/netzentwicklungsplan-2030-2019> (Zugriff am 09.09.2019)
- Adlunger, K., Lange, M. & Schmied, M. (2013). Treibhausgasneutraler Verkehr im Jahre 2050. Notwendiges Zusammenspiel von Energie- und Verkehrswende *Internationales Verkehrswesen* 65, 14-16.
- Adrian, L., Bock, S., Bunzel, A., Preuß, T. & Rakel, M. (2018). *Instrumente zur Reduzierung der Flächeninanspruchnahme. Aktionsplan Flächensparen*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 38/2018. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-24\\_texte\\_38-2018\\_reduzierung-flaecheninanspruchnahme.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-05-24_texte_38-2018_reduzierung-flaecheninanspruchnahme.pdf) (Zugriff am 23.09.2019)
- AEE (2017). Grafik-Dossier: Akzeptanzumfrage 2017. Download unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafi-ken/grafik-dossier-akzeptanzumfrage-2017> (Zugriff am 08.09.2017)
- AGEB (2019, 05.01.2019). Anwendungsbilanzen. Download unter: <https://ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html> (Zugriff am 12.09.2019)
- AGEE-Stat (2017). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2017 (unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik)*. Download unter: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html) (Zugriff am 16.02.2017)
- Agemar, T., Alten, J.-A., Ganz, B., Kuder, J., Kühne, K., Schumacher, S. & Schulz, R. (2014). The Geothermal Information System for Germany – GeotIS. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, 165(2), 129-144.
- Agemar, T., Weber, J. & Schulz, R. (2014). Deep Geothermal Energy Production in Germany. *Energies*, 7, 4397-4416.
- Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Kennzeichnung von Luftfahrthindernissen. Zuletzt geändert durch die Verwaltungsvorschrift vom 26. August 2015 (BANz AT 01.09.2015 B4). (2015).
- Bar-Yam, Y. (2002). General Features of Complex Systems. *Encyclopedia of Life Support Systems*.
- BBSR (2015). *Wohnungsmarktprognose 2030*. Bonn. Download unter: [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2015/DL\\_07\\_2015.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2015/DL_07_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=5) (Zugriff am 19.09.2019)
- bdguss. (2019). Die Gießerei-Industrie. Eine starke Branche in Zahlen. Retrieved from [https://www.bdguss.de/fileadmin/content\\_bdguss/BDG-Service/Infothek/Broschueren/BDG\\_EinestarkeBranche.pdf](https://www.bdguss.de/fileadmin/content_bdguss/BDG-Service/Infothek/Broschueren/BDG_EinestarkeBranche.pdf).
- BDI (2018). *Klimapfade für Deutschland*. Download unter: <https://e.issuu.com/embed.html#2902526/57478058> (Zugriff am 26.03.2019)
- Beckmann, K., Gies, J., Thiemann-Linden, J. & Preuß, T. (2011). *Leitkonzept - Stadt und Region der kurzen Wege. Gutachten im Kontext der Biodiversitätsstrategie*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 48/2011. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitkonzept-stadt-region-kurzen-wege> (Zugriff am 23.09.2019)
- Bergk, F., Biemann, K., Heidt, C., Knörr, W., Lambrecht, U., Schmidt, T., . . . Weindorf, W. (2016). *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. 56/2016. Download unter:



[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte\\_56\\_2016\\_klimaschutzbeitrag\\_des\\_verkehrs\\_2050\\_getagged.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf) (Zugriff am 06.09.2019)

Bergmann, T., Bleher, D. & Jenseit, W. (2015). *Ressourceneffizienzpotenziale im Tiefbau. Materialaufwendungen und technische Lösungen*. Berlin. Download unter: [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/studien/Studie\\_Ressourceneffizienzpotenziale\\_im\\_Tiefbau.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/Studie_Ressourceneffizienzpotenziale_im_Tiefbau.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

Bertram, A. & Plenefisch, T. (2017). Kein hohes Risiko. *Stadt + Werk*, 1/2, 18-21.

Bertram, C., Bodirsky, B., Creutzig, F., Delsa, L., Fuss, S., Humpenöder, F., . . . von Stechow, C. (2017). *Global greenhouse gas emission pathways until 2050 : Final Report*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 14/2019. Potsdam, Berlin, Dessau-Roßlau. Download unter:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/global-greenhouse-gas-emission-pathways-until-2050> (Zugriff am 23.05.2019)

Bettgenhäuser, K., Offermann, M., Sandau, F. & Gerhardt, N. (2019). *Systemischer Vergleich von Wärmeversorgungs-techniken in einem regenerativen Energiesystem*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 33/2016. Dessau-Roßlau. Download unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2016-11-23\\_thgnd-ii\\_endbericht\\_final\\_uba\\_final.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/2016-11-23_thgnd-ii_endbericht_final_uba_final.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

Beuth Hochschule für Technik & ifeu-Institut (2017). *Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich. Kurztitel: Anlagenpotenzial*. Berlin, Heidelberg. Download unter:

[https://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/prof/jochum/Downloads/Anlagenpotenzial\\_Endbericht.pdf](https://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/prof/jochum/Downloads/Anlagenpotenzial_Endbericht.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

Blum, A. & Gutting, R. (2017/2018). Ressourceneffekte des Bauens und Wohnens im demografischen Wandel. *Leerstand- und Flächenmanagement im Ländlichen Raum*. 30. Heiligenstadter und Ansbacher Gespräche 2017/18, 9-14. Retrieved from [http://www.institut-laendliche-entwicklung.de/data/30\\_Flaechenmanagement\\_Einzelseiten.pdf](http://www.institut-laendliche-entwicklung.de/data/30_Flaechenmanagement_Einzelseiten.pdf).

BMEL (2017). *Statistik und Berichte des BMEL. D. Ernährungswirtschaft*. Download unter: [https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/user\\_upload/monatsberichte/SJT-4050700-0000.xlsx](https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/user_upload/monatsberichte/SJT-4050700-0000.xlsx)

BMEL (2018a). Ernährung, Fischerei. Ernährungswirtschaft: Versorgungsbilanzen. Download unter: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/> (Zugriff am 07.10.2019)

BMEL (2018b). *Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2017. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung*. Bonn. Download unter: [https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht\\_2017.pdf;jsessionid=065BF292B2BFC83DF45284F076F460EF.1\\_cid325?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2017.pdf;jsessionid=065BF292B2BFC83DF45284F076F460EF.1_cid325?__blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am 11.09.2019)

BMEL (2019a). Pressemitteilung Nr. 77. Klöckner: „Die Land- und Forstwirtschaft leistet ihren Beitrag zum Klimaschutz“. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft hat einen konkreten Maßnahmenkatalog vorgelegt – Klimakabinett kam zur ersten Sitzung zusammen [Pressemitteilung]. Download unter:

[https://www.raiffeisen.de/sites/default/files/2019-04/190410\\_Presseinformation\\_des\\_Bundesministeriums\\_fuer\\_Ernaehrung\\_und\\_Landwirtschaft.pdf](https://www.raiffeisen.de/sites/default/files/2019-04/190410_Presseinformation_des_Bundesministeriums_fuer_Ernaehrung_und_Landwirtschaft.pdf)

BMEL (2019b). *Pro-Kopf-Verbrauch von ausgewählten Milcherzeugnissen*. Download unter:

[https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/MilchUndMilcherzeugnisse/JaehrlicheErgebnisse/Deutschland/Dt\\_VersorgungVerbrauch/40600300153.xlsx?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/MilchUndMilcherzeugnisse/JaehrlicheErgebnisse/Deutschland/Dt_VersorgungVerbrauch/40600300153.xlsx?__blob=publicationFile&v=4)

BMEL (2019c). Zu gut für die Tonne! Download unter:

[https://www.bmel.de/DE/Ernaehrung/ZuGutFuerDieTonne/zgfdt\\_node.html](https://www.bmel.de/DE/Ernaehrung/ZuGutFuerDieTonne/zgfdt_node.html) (Zugriff am 02.10.2019)

BMEL (2019d). *Zukunftsstrategie ökologischer Landbau . Impulse für mehr Nachhaltigkeit in Deutschland*.

Berlin. Download unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Zukunftsstrategie-oekologischer-](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Zukunftsstrategie-oekologischer-Landbau.pdf;jsessionid=EB1A5A9ABD4D357203F24BD00DD954BF.1_cid385?_blob=publicationFile)

[Landbau.pdf;jsessionid=EB1A5A9ABD4D357203F24BD00DD954BF.1\\_cid385?\\_blob=publicationFile](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Zukunftsstrategie-oekologischer-Landbau.pdf;jsessionid=EB1A5A9ABD4D357203F24BD00DD954BF.1_cid385?_blob=publicationFile) (Zugriff am 02.10.2019)

BMU (2012). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*. Berlin. Download unter:

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/progress\\_broschuere\\_de\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf) (Zugriff am 19.09.2017)

BMU (2016a). *Den ökologischen Wandel gestalten* Berlin. Download unter:

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/integriertes\\_umweltprogramm\\_2030\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/integriertes_umweltprogramm_2030_bf.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

BMU (2016b). *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*.

Download unter:

[http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) (Zugriff am 19.09.2017)

BMU (2017). *Projektionsbericht 2017 für Deutschland. Gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013*. Berlin. Download

unter: [http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14\\_lcds\\_pams\\_projections/projections/envwqc4\\_g/170426\\_PB\\_2017\\_-\\_final.pdf](http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envwqc4_g/170426_PB_2017_-_final.pdf) (Zugriff am 01.04.2019)

BMU (2019a). Kommission "Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung". Download unter:

[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?_blob=publicationFile&v=4) (Zugriff am 09.04.2019)

BMU (2019b). *Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013*. Berlin. Download unter: [https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-](https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf)

[14\\_lcds\\_pams\\_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf](https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf) (Zugriff am 01.04.2019)

BMU & UBA (2019). *Umweltbewusstsein in Deutschland 2018. Ergebnisse einer repräsentativen*

*Bevölkerungsumfrage*. Berlin, Dessau-Roßlau. Download unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/ubs2018\\_-\\_m\\_3.3\\_basisdatenbroschuere\\_barrierefrei-02\\_cps\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/ubs2018_-_m_3.3_basisdatenbroschuere_barrierefrei-02_cps_bf.pdf) (Zugriff am 09.09.2019)

BMUB (2016). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen*. Berlin. Download unter:

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/progress\\_ii\\_broschuere\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

BMVI (2014). *Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Zusammenfassung der Ergebnisse*. Download unter:

[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-zusammenfassung-los-3.pdf?_blob=publicationFile) (Zugriff am 23.09.2019)

BMVI (2015). *Räumlich differenzierte Flächen-potentiale für erneuerbare Energien in Deutschland*. BMVI-

Online-Publikation, Nr. 08/2015. Berlin. Download unter: <https://d-nb.info/1075812623/34> (Zugriff am 09.09.2019)

BMWi (2010). *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Berlin. Download unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am 29.05.2019)

BMWi (2018). *Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017*. Berlin. Download unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=27](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.pdf?__blob=publicationFile&v=27) (Zugriff am 11.09.2019)

BMWi (2019a). *Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi*. Berlin. Download unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.html> (Zugriff am 16.07.2019)

BMWi (2019b). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 1990-2018*. Download unter: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html) (Zugriff am 09.09.2019)

Bodle, R., Stockhaus, H., Sina, S., Gerstetter, C., Donat, L., Bach, I., . . . Soerensen, A. M. (Veröffentlichung in Planung). *International governance for environmentally sound supply of raw materials - policy options and recommendations*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: (Zugriff am

Boeing (2018). *Commercial market outlook 2018-2037*. Chicago. Download unter: <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/> (Zugriff am 27.09.2019)

Bowker, L. & Chambers, D. (2017). In the Dark Shadow of the Supercycle Tailings Failure Risk & Public Liability Reach All Time Highs. *Environments*, 4(4), 75.

Bowker, L., Rodriguez, R. L., Emerman, S. H., Losekann, C. & Williams, B. (2019). World Mine Tailings Failures—from 1915. Download am unter: <https://worldminetailingsfailures.org/>

Bringezu, S. (2015). Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. *Resources*, 4(1).

Bruns, E., Ohlhorst, D., Wenzel, B. & Köppel, J. (2009). *Innovationsbiographie erneuerbare Energien*. Berlin. Download unter: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-2379> (Zugriff am 09.09.2019)

Buchert, M., Degreif, S., Bulach, W., Schüler, D., Prakash, S., Möller, M., . . . Röben, A. (2019). *Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 03/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-14\\_texte\\_03-2019\\_subskrit\\_abschlussbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-14_texte_03-2019_subskrit_abschlussbericht.pdf) (Zugriff am 13.09.2019)

Bundesnetzagentur (2016). Szenariorahmen 2017-2030. Download unter: [https://www.netzausbau.de/bedarfsermittlung/2030\\_2017/szenariorahmen2017-2030/de.html](https://www.netzausbau.de/bedarfsermittlung/2030_2017/szenariorahmen2017-2030/de.html) (Zugriff am 12.09.2019)

Bundesnetzagentur (2019). Windenergieanlagen auf See. Download unter: [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Ausschreibungen/Offshore/offshore-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Ausschreibungen/Offshore/offshore-node.html) (Zugriff am 09.09.2019)

Bundesregierung (1998). *Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm)*. Geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 01.06.2017 (BANz AT 08.06.2017 B5). GMBI Nr. 26/1998. Download unter: [http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_26081998\\_IG19980826.htm](http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_26081998_IG19980826.htm) (Zugriff am 09.09.2019)

Bundesregierung (2002). *Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung*. Berlin. Download unter: <https://www.nachhaltigkeit.info/media/1326188329phpYJ8KrU.pdf> (Zugriff am 02.07.2019)

Bundesregierung (2016). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuauflage 2016*. Berlin. Download unter: [https://www.bundesregierung.de/Content/Infomaterial/BPA/Bestellservice/Deutsche\\_Nachhaltigkeitsstrategie\\_Neuauflage\\_2016.pdf?blob=publicationFile&v=26](https://www.bundesregierung.de/Content/Infomaterial/BPA/Bestellservice/Deutsche_Nachhaltigkeitsstrategie_Neuauflage_2016.pdf?blob=publicationFile&v=26) (Zugriff am 02.07.2019)

Bundesregierung (2018a). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018*. Berlin. Download unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1546450/65089964ed4a2ab07ca8a4919e09e0af/2018-11-07-aktualisierung-dns-2018-data.pdf?download=1> (Zugriff am 13.09.2019)

Bundesregierung (2018b). *Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode*. Download unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/847984/5b8bc23590d4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf?download=1> (Zugriff am 23.09.2019)

Bundesregierung (2019). *Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. Fassung nach Klimakabinett*. Berlin. Download unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1673502/855f58eed07bcbbd697820b4644e83a7/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf?download=1> (Zugriff am 26.09.2019)

Bürger, V., Hermann, A., Keimeyer, F., Brunn, C., Haus, D., Menge, J. & Klinski, S. (2013). *Konzepte für die Beseitigung rechtlicher Hemmnisse des Klimaschutzes im Gebäudebereich*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 11/2013. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzepte-fuer-die-beseitigung-rechtlicher-hemmnisse-0> (Zugriff am 23.09.2019)

BVE. (2019). Jahresbericht 2018/2019. Retrieved from <https://www.bve-online.de/download/bve-jahresbericht-ernaehrungsindustrie-2019>.

Cames, M. (2019). *Klimaschutz im Luft- und Seeverkehr: Strategiepapier Luftfahrt (In Druck)*. (Im Auftrag des Umweltbundesamtes). Dessau-Roßlau.

Climate Action Network Europe (2018). *European Commission's draft EU Long Term Strategy and the Paris Agreement*. Download unter: <http://www.caneurope.org/docman/climate-energy-targets/3462-can-europe-briefing-on-eu-long-term-strategy-and-the-paris-agreement/file> (Zugriff am 17.10.2019)

Climate Action Tracker (2018). *Global emissions time series*.

Climate Action Tracker (2019). Addressing global warming. Download unter: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/> (Zugriff am 23.05.2019)

Climate Analytics (2018). *Wissenschaftlich begründeter Kohle-Ausstiegspfad für Deutschland im Einklang mit der 1,5°C Erwärmungsgrenze des Pariser Klima-Abkommens. Chance und Nutzen einer beschleunigten Energiewende*. Download unter: [https://climateanalytics.org/media/deutsch\\_extended\\_executive\\_summary\\_final.pdf](https://climateanalytics.org/media/deutsch_extended_executive_summary_final.pdf) (Zugriff am 13.09.2019)

Climate Recon (2019). *Planning for 2050. Summary of Insights. Briefing Note*. Download unter: <https://climatedialogue.eu> (Zugriff am 17.10.2019)

Crutzen, P. J. (2006). The "Anthropocene". In E. Ehlers & T. Krafft (Eds.), *Earth System Science in the Anthropocene* (pp. 13-18). Berlin, Heidelberg: Springer.

Cullen, J. (2017). Circular Economy: Theoretical Benchmark or Perpetual Motion Machine? *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 483-486.



de Coninck, H., Revi, A., Babiker, M., Bertoldi, P., Buckeridge, M., Cartwright, A., . . . Sugiyama, T. (2018). Strengthening and Implementing the Global Response. In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (pp. 313-443). Genf: IPCC.

Dehoust, G. e. a. (2019). *Further development of policy options for an ecological raw materials policy*. (Im Auftrag des Umweltbundesamtes).

DEHSt. (2019). Treibhausgasemissionen 2018. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2018). Retrieved from [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4.com](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=4.com).

Deilmann, C., Gruhler, K. & Krauß, N. (2014). *Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau*. Dresden. Download unter: [https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2013/Kreislaufwirtschaftspotenzial/Endbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2013/Kreislaufwirtschaftspotenzial/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2) (Zugriff am 19.09.2019)

dena (2012). *dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromteilnetze in Deutschland bis 2030*. Berlin. Download unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9100\\_dena-Verteilnetzstudie\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9100_dena-Verteilnetzstudie_Abschlussbericht.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)

dena (2018). *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. Download unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_lang.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf) (Zugriff am 26.03.2019)

DERA (2013). *DERA Rohstoffinformationen. Risikobewertung - Kupfer. Kurzbericht*. Berlin. Download unter: [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-16.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-16.pdf?__blob=publicationFile&v=7) (Zugriff am 17.10.2019)

Deutscher Bundestag (2016). *Auswirkungen des Einsatzes von Nitrifikations- und Ureasehemmern in der Landwirtschaft. Sachstand*. WD 8 -3000 -79/16. Berlin. Download unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/492262/a8c531e50113e5ac08b3b5988f3dc595/WD-8-079-16-pdf-data.pdf> (Zugriff am 07.10.2019)

DGE (2017). *Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE*. Bonn. Download unter: <https://www.dge-medienervice.de/allgemeine-ernaehrungsempfehlungen/vollwertig-essen-und-trinken-nach-den-10-regeln-der-dge-poster.html> (Zugriff am 13.09.2019)

Dittrich, M., Gerhardt, N., Schoer, K., Dünnebeil, F., Becker, S., Oehsen, A. v., . . . Auberger, A. (2020a). *Transformationsprozess zum treibhausgasneutrale und ressourcenschonendem Deutschland – GreenEe* (Climate Change 01/2020). Dessau-Roßlau.

Dittrich, M., Gerhardt, N., Schoer, K., Dünnebeil, F., Becker, S., Oehsen, A. v., . . . Auberger, A. (2020b). *Transformationsprozess zum treibhausgasneutrale und ressourcenschonendem Deutschland – GreenLate*. (Climate Change 02/2020). Dessau-Roßlau.

Dittrich, M., Gerhardt, N., Schoer, K., Dünnebeil, F., Becker, S., Oehsen, A. v., . . . Auberger, A. (2020c). *Transformationsprozess zum treibhausgasneutrale und ressourcenschonendem Deutschland – GreenMe*. (Climate Change 03/2020). Dessau-Roßlau.

Dittrich, M., Gerhardt, N., Schoer, K., Dünnebeil, F., Becker, S., Oehsen, A. v., . . . Auberger, A. (2020d). *Transformationsprozess zum treibhausgasneutrale und ressourcenschonendem Deutschland – GreenLife*. (Climate Change 04/2020). Dessau-Roßlau.

- Dittrich, M., Gerhardt, N., Schoer, K., Dünnebeil, F., Becker, S., Oehsen, A. v., . . . Auberger, A. (2020e). *Transformationsprozess zum treibhausgasneutrale und ressourcenschonendem Deutschland – GreenSupreme*. (Climate Change 05/2020). Dessau-Roßlau.
- Dittrich, M., Kämper, C., Ludmann, S., Ewers, B., Giegrich, J., Sartorius, C., . . . Schoer, K. (2018). *Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 29/2018. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-11\\_texte\\_29-2018\\_deteress.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-11_texte_29-2018_deteress.pdf) (Zugriff am 11.09.2019)
- DLR, ifeu & Institut, W. (2004). *Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland. Langfassung*. Stuttgart, Heidelberg, Wuppertal. Download unter: <https://www.ifeu.de/projekt/opt-ausbau-ee-d/> (Zugriff am 09.09.2019)
- DLR, IWES & IFNE (2012). *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht*. Stuttgart. Download unter: [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische\\_Papiere\\_anderer/12.03.29.BMU\\_Leitstudie2011/BMU\\_Leitstudie2011.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf) (Zugriff am 11.09.2019)
- Döring, P., Glasenapp, S. & Mantau, U. (2016). *Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2014. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Abschlussbericht*. Hamburg. Download unter: [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn058691.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn058691.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)
- Duscha, V., Wachsmuth, J. & Donat, L. (2017). *Analysis of selected climate protection scenarios for European countries. Substudy Report - 2. Revised Edition*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 10/2017. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-25\\_climate-change\\_10-2017\\_eu-climate-protection-szenarios\\_edition2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-25_climate-change_10-2017_eu-climate-protection-szenarios_edition2.pdf) (Zugriff am 17.10.2019)
- ecoinvent (2019). Ecoinvent. Database version 2.2. Download am 18.10.2019 unter: <https://www.ecoinvent.org/>
- EcoTransIT world (2019). Berechnungsparameter. Download am 27.09.2019 unter: <https://www.ecotransit.org/impressum.en.html>
- EEA (2018). *Overview of Low-Carbon Development Strategies in European Countries. ETC/ACM 2018/12 report*. Download unter: <https://www.eionet.europa.eu/> (Zugriff am 10.07.2019)
- EK (2010). *Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*. Brüssel. Download unter: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2010-2020-europe-2020> (Zugriff am 02.07.2019)
- EK (2011). *Energy Roadmap 2050*. COM(2011) 885 final. Brüssel. Download unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52011DC0885&from=EN> (Zugriff am 02.07.2019)
- EK (2015). *Den Kreislauf schließen - Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen*. COM(2015) 614 final. Brüssel. Download unter: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2015/DE/1-2015-614-DE-F1-1.PDF> (Zugriff am 17.10.2019)
- EK (2017). *Communication from the commission to the European Parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions on the 2017 list of critical raw materials for the EU* COM(2017) 490 final. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490> (Zugriff am 17.10.2019)

EK (2018a). *Ein sauberer Planet für alle. Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft*. COM(2018) 773 final. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=COM%3A2018%3A773%3AFIN> (Zugriff am 02.07.2019)

EK (2018b). *In-depth analysis in support of the commission communication com(2018) 773. A Clean Planet for all A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*. Brüssel. Download unter: [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com\\_2018\\_733\\_analysis\\_in\\_support\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_analysis_in_support_en_0.pdf) (Zugriff am 17.10.2019)

EK (2019a). 2020 climate & energy package. Download unter: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en) (Zugriff am 17.10.2019)

EK (2019b). *A Sustainable Europe by 2030*. Brüssel. Download unter: [https://ec.europa.eu/commission/publications/reflection-paper-towards-sustainable-europe-2030\\_en](https://ec.europa.eu/commission/publications/reflection-paper-towards-sustainable-europe-2030_en) (Zugriff am 10.05.2019)

Emele, L., Marignac, Y. & Petrovic, S. (2019). *Modelling net-zero emissions. Technical Note within Climate Recon Project*. Download unter: <https://climatedialogue.eu> (Zugriff am 17.10.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2002). *Beschluss Nr. 1600/2002/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juli 2002 über das sechste Umweltaktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft*. 1600/2002/EG. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32002D1600> (Zugriff am 12.09.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2013). *Verordnung (EU) 525/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen sowie für die Berichterstattung über diese Emissionen und über andere klimaschutzrelevante Informationen auf Ebene der Mitgliedstaaten und der Union und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 280/2004/EG*. 525/2013. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:165:0013:0040:DE:PDF> (Zugriff am 17.10.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2014). *Verordnung (EUR) Nr. 517/2014 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006*. 517/2014. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517> (Zugriff am 30.09.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2016). *Richtlinie (EU) 2016/2284 des europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2016 über die Reduktion der nationalen Emissionen bestimmter Luftschadstoffe, zur Änderung der Richtlinie 2003/35/EG und zur Aufhebung der Richtlinie 2001/81/EG*. 2016/2284. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016L2284&from=DE> (Zugriff am 30.09.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2018a). *Richtlinie (EU) 2018/2001 des europäischen Parlamentes vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen*. PE/48/2018/REV/1. Brüssel. Download unter: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj> (Zugriff am 10.09.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2018b). *Verordnung (EU) 2018/1999 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates*. 2018/1999. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32018R1999&from=EN> (Zugriff am 17.10.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2019). *Verordnung (EU) 2019/631 des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festsetzung von CO<sub>2</sub>-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011. Neufassung.* 2019/631. Brüssel. Download unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=EN> (Zugriff am 27.09.2019)

ER (2019). *Tagung des Europäischen Rates (20. Juni 2019) – Schlussfolgerungen.* Brüssel. Download unter: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9-2019-INIT/de/pdf> (Zugriff am 16.09.2019)

Ericsson, M. & Löf, O. (2019). Mining's contribution to national economies between 1996 and 2016. *Mineral Economics*, 32(2), 223-250.

Europäische Bewegung Deutschland e.V. (2019). Klimaneutralität in der EU? Gemeinsame Veranstaltung mit dem DNR und Germanwatch. Download unter: <https://www.netzwerk-ebd.de/nachrichten/klimaneutralitaet-in-der-eu-gemeinsame-veranstaltung-mit-dem-dnr-und-germanwatch/> (Zugriff am 17.10.2019)

Fachagentur Wind an Land (2015). *Mehr Abstand – mehr Akzeptanz? Ein umweltpsychologischer Studienvergleich. Analyse.* Berlin. Download unter: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjD7\\_yvkcPkAhUOGuWKHaMIDYYQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/FA-Wind\\_Abstand-Akzeptanz\\_Broschuere\\_2015.pdf](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjD7_yvkcPkAhUOGuWKHaMIDYYQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/FA-Wind_Abstand-Akzeptanz_Broschuere_2015.pdf) (Zugriff am 08.03.2019)

Fachagentur Wind an Land (2019a). *Ausbausituation der Windenergie an Land im Frühjahr 2019. Auswertung windenergiespezifischer Daten im Marktstammdatenregister für den Zeitraum Januar bis März 2019.* Berlin. Download unter: [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA\\_Wind\\_Zubauanalyse\\_Wind-an-Land\\_Halbjaehr\\_2019.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA_Wind_Zubauanalyse_Wind-an-Land_Halbjaehr_2019.pdf) (Zugriff am 09.09.2019)

Fachagentur Wind an Land (2019b). *Überblick Windenergie an Land. Anlagenhöhe, Flächenbedarf, Turbinenzahl. Kurzanalyse.* Berlin. Download unter: [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA\\_Wind\\_Hoehenbegrenzungen\\_Wind-an-Land\\_03-2019.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Faktenpapiere/FA_Wind_Hoehenbegrenzungen_Wind-an-Land_03-2019.pdf) (Zugriff am 09.09.2019)

Fiedler, C., Greif, S. & Schmid, T. (2019). Potenzialanalyse zur Nutzung von Erdwärmepumpen im Gebäudebestand - Oberflächennahe Geothermie im außerstädtischen Wohngebäudebestand. Download unter: <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/894-potenzialanalyse-zur-nutzung-von-erdwaermepumpen-im-gebaeudebestand-oberflaechennahe-geothermie-im-ausserstaed-tischen-wohngebaeudebestand> (Zugriff am 23.09.2019)

Flessa, H., Müller, D., Plassmann, K., Osterburg, B., Techen, A.-K., Nitsch, H., . . . Anspach, V. (2012). Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor. *Landbauforschung, Sonderheft 361*, 87. Retrieved from [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn050716.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn050716.pdf).

FNR (2018). *Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen.* Prüzen. Download unter: [https://fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/GFG\\_Band\\_57\\_Pflanzenbauliche\\_Verwertung\\_Web.pdf](https://fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/GFG_Band_57_Pflanzenbauliche_Verwertung_Web.pdf) (Zugriff am 11.09.2019)

FNR (2019). *Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland.* Download unter: <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf> (Zugriff am 29.05.2019)

Fraunhofer IEE. (2019). Transformationspfade im Wärmesektor. Retrieved from <https://www.iee.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/transformationpfade-im-waermesektor.html>.



Fraunhofer ISE (2019). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fassung vom 29.05.2019*. Download unter: [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de) (Zugriff am 29.05.2019)

Fraunhofer ISI, consentec & ifeu (2017). *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland*. Karlsruhe. Download unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basiszenario.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basiszenario.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (Zugriff am 12.09.2019)

Garthe, S., Schwemmer, H., Müller, S., Peschko, V., Markones, N. & Mercker, M. (2018). *Seetaucher in der Deutschen Bucht: Verbreitung, Bestände und Effekte von Windparks. Bericht für das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und das Bundesamt für Naturschutz*. Kiel.

Glada, L. & Paul, S. (2018). The curse of the one-size-fits-all fix. Re-evaluating what we know about extractives and economic development In *Extractive Industries*: Oxford University Press.

Graedel, T., Harper, E., Nassar, N., Nuss, P. & Reck, B. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257.

Graedel, T., Harper, E., Nassar, N. & Reck, B. (2013). On the materials basis of modern society. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112. doi:10.1073/pnas.1312752110

Greenpeace (2018). *Wenn Wälder wieder wachsen. Eine Waldvision für Klima, Mensch und Natur* Hamburg. Download unter: [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s02061\\_greenpeace\\_studie\\_waldvision.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s02061_greenpeace_studie_waldvision.pdf) (Zugriff am 13.09.2019)

Grünberg, J., Nieberg, H. & Schmidt, T. G. (2010). Treibhausgasbilanzierung von Lebensmitteln (Carbon Footprints): Überblick und kritische Reflektion. *Landbauforschung = Applied agricultural and forestry research : journal of applied research in agriculture and forestry*, 60(2), 53-72.

Haber, W. & Held, M. (2016). *Die Welt im Anthropozän. Erkundungen im Spannungsfeld zwischen Ökologie und Humanität*. München: oekom.

Hatfield-Dodds, S., Schandl, H., Newth, D., Obersteiner, M., Cai, Y., Baynes, T., . . . Havlik, P. (2017). Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. *Journal of Cleaner Production*, 144, 403-414.

Hedemann, J., Meinshausen, I., Ortlepp, R., Schiller, G., Liebich, A. & Möller, A. (2017). *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (KartAL II)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 58/2017. Dessau-Roßlau. Download unter: (Zugriff am 02.07.2019)

Heißenhuber, A., Haber, W. & Krämer, C. (2015). *30 Jahre SRU-Sondergutachten „Umweltprobleme der Landwirtschaft“ - eine Bilanz*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 28/2015. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_28\\_2015\\_umweltprobleme\\_der\\_landwirtschaft.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_28_2015_umweltprobleme_der_landwirtschaft.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

Helms, H., Jöhrens, J., Kämper, C., Giegrich, J., Liebich, A., Vogt, R. & Lambrecht, U. (2016). *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 27/2016. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_27\\_2016\\_umweltbilanz\\_von\\_elektrofahrzeugen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_27_2016_umweltbilanz_von_elektrofahrzeugen.pdf) (Zugriff am 06.09.2019)

Herden, C., Rassmus, J. & Gharadjedaghi, B. (2009). *Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen*. Bonn. Download unter: <https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/skript247.pdf> (Zugriff am 09.09.2019)

Hirschnitz-Garbers, M., Distelkamp, M., Koca, D., Meyer, M. & Sverdrup, H. (2018). *Potentiale und Kernergebnisse der Simulationen von Ressourcenschonung(spolitik). Endbericht des Projekts „Modelle, Potentiale und Langfristszenarien für Ressourceneffizienz“ (Sim-Ress)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 48/2018. Dessau-Roßlau. Download unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-25\\_texte\\_48-2018\\_simress-endbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-06-25_texte_48-2018_simress-endbericht.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

Hodge, R. A. (2011). Mining and Sustainability. In *SME Mining Engineering Handbook* (pp. 1665-1688). Englewood: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.

Höhne, N., Emmrich, J., Fekete, H. & Kuramochi, T. (2019). *1,5°C: Was Deutschland tun muss*. Verden/Aller.

Download unter: [https://newclimate.org/wp-content/uploads/2019/03/Deutschland\\_1.5\\_Web.pdf](https://newclimate.org/wp-content/uploads/2019/03/Deutschland_1.5_Web.pdf) (Zugriff am 13.09.2019)

IEA (2015). *World energy Outlook 2015 (WEO). Bericht*. Paris.

ifeu, Fraunhofer IEE & Consentec (2018). *Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung. Studie im Auftrag von Agora Energiewende*. Berlin. Download unter:

[https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Heat\\_System\\_Benefit/143\\_Heat\\_System\\_benefits\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Heat_System_Benefit/143_Heat_System_benefits_WEB.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)

ifeu Heidelberg, INFRAS Berne & IVE Hannover (2019). *Ecological transport information tool for worldwide transports*. Download unter:

[https://www.ecotransit.org/download/EcoTransIT\\_World\\_Methodology\\_Data\\_Update\\_2018.pdf](https://www.ecotransit.org/download/EcoTransIT_World_Methodology_Data_Update_2018.pdf) (Zugriff am 27.09.2019)

IGF (2018). *Standards and the Extractive Economy. State of Sustainability Initiatives Review*. Winnipeg.

Download unter: <https://www.iisd.org/sites/default/files/publications/igf-ssi-review-extractive-economy.pdf> (Zugriff am 17.10.2019)

IIASA (2019a). Download unter: <https://www.iiasa.ac.at/> (Zugriff am 16.09.2019)

IIASA (2019b). IAMC 1.5°C Scenario Explorer. International Institute for Applied Systems Analysis. Download am 12.09.2019 unter: <https://db1.ene.iiasa.ac.at/IPCCSR15DB/dsd?Action=htmlpage&page=welcome>

Imboden, D. & Koch, S. (2003). *Systemanalyse: Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

IPCC. (2014a). Chapter 3. Rewetted organic soils. In *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Bern.

IPCC (2014b). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genf. Download unter:

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

IPCC (2018a). *Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Download unter: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

IPCC (2018b). *Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Summary for Policymakers*. Download unter:

[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

IRMA (2019). IRMA works to bring about more socially and environmentally responsible mining. Download unter: <https://responsiblemining.net/> (Zugriff am 18.10.2019)

IRP (2014). *Managing and conserving the natural resource base for sustained economic and social development – A reflection from the International Resource Panel on the establishment of Sustainable Development Goals aimed at decoupling economic growth from escalating*. Download unter: <http://www.resourcepanel.org/file/244/download?token=OHRPH1MH> (Zugriff am 19.09.2017)

Karl, A., Stein, A., Werner, J. & Regling, L. (2019). *PBefG Novelle: Zulassung App basierter Fahrdienste mit Augenmaß. Thematischer Vorabauszug aus dem Gesamtbericht: Grundlagen für ein umweltorientiertes Recht der Personenbeförderung*. Berlin. Download unter: [https://www.kcw-online.de/content/6-veroeffentlichungen/152-rechtsinnmobil-gutachten/20190430\\_pbefg-novelle\\_kcw.pdf](https://www.kcw-online.de/content/6-veroeffentlichungen/152-rechtsinnmobil-gutachten/20190430_pbefg-novelle_kcw.pdf) (Zugriff am 23.09.2019)

KfW (2018). *Energieeffizient Bauen. Anlage zum Merkblatt*. Frankfurt am Main. Download unter: [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000003465\\_M\\_153\\_EEB\\_TMA\\_2018\\_04.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000003465_M_153_EEB_TMA_2018_04.pdf) (Zugriff am 20.09.2019)

Kickler, K., Kosmol, J., Franken, G., Scholl, C., Mori Junior, R., Rüttinger, L. & Sturman, K. (2018). *Mapping Sustainability Standard Systems in Mineral Supply Chains*. Hannover. Download unter: [https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Rohstoffwirtschaft/59\\_sustainability\\_standards.pdf?blob=publicationFile&v=3](https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/59_sustainability_standards.pdf?blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am 17.10.2019)

Knappe, F., Reinhardt, J., Bergmann, T. & Mottschall, M. (2015). *Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3714\\_48\\_101\\_anpassung\\_klima\\_wandel\\_teil\\_2\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3714_48_101_anpassung_klima_wandel_teil_2_bf.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

Kosmol, J., Müller, F. & Keßler, H. (2018). The Critical Raw Materials Concept: Subjective, Multifactorial and Ever-Developing. In H. Lehmann (Ed.), *Factor X: Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources* (pp. 71-92). Cham: Springer International Publishing.

Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W. & Wiedenhofer, D. (2018). *From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. Version 1.1 (February 2018)*. Download unter: [https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73700/Data\\_Download/Data/Online\\_data\\_Krausmann\\_et\\_al\\_2018.xlsx](https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H73000/H73700/Data_Download/Data/Online_data_Krausmann_et_al_2018.xlsx)

Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., . . . Haberl, H. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8), 1880-1885.

Lanau, M., Liu, G., Kral, U., Wiedenhofer, D., Keijzer, E., Yu, C. & Ehlert, C. (2019). Taking Stock of Built Environment Stock Studies: Progress and Prospects. *Environmental Science & Technology*, 53(15), 8499-8515.

Länderausschuss für Immissionsschutz (2002). *Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen (WEA-Schattenwurf-Hinweise)*.

LAZBW. (2018). *Gülldüngung im Grünland Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung*(27). Retrieved from [http://www.lazbw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw\\_2017/lazbw\\_gl/Gr%C3%BCnlandwirtschaft\\_und\\_Futterbau/Wirtschaftsduenger/Dokumente\\_Wirtschaftsd%C3%BCnger/Merkblatt%2027\\_G%C3%BClled%C3%BCngung%20im%20Gr%C3%BCnland.pdf?attachment=true](http://www.lazbw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_2017/lazbw_gl/Gr%C3%BCnlandwirtschaft_und_Futterbau/Wirtschaftsduenger/Dokumente_Wirtschaftsd%C3%BCnger/Merkblatt%2027_G%C3%BClled%C3%BCngung%20im%20Gr%C3%BCnland.pdf?attachment=true).

Lee, D. (2018). The role of aviation in a post-Paris Agreement climate world. In preparation.

Lehmann (Ed.), H. (2018). *Factor X. Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources*. Cham: Springer.

Leipziger Institut für Energie GmbH (2011). *Vorhaben II c Solare Strahlungsenergie*. Leipzig. Download unter: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Gesetze-Verordnungen/eeg\\_eb\\_2011\\_solare\\_strahlung\\_bf.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Gesetze-Verordnungen/eeg_eb_2011_solare_strahlung_bf.html) (Zugriff am 09.09.2019)

Lohse, C. & Schuberth, J. (2019). Geothermische Wärme für Gebäude – Eine energie- und umweltpolitische Einordnung. *Geothermische Energie*, 91(1), 30-33.

Loske, R. & Bleischwitz, R. (1996). *Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung*. Basel: BUND; Misereor.

Månberger, A. & Stenqvist, B. (2018). Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. *Energy Policy*, 119, 226-241.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056>

Mancini, L., Vidal Legaz, B., Vizzarri, M., Wittmer, D., Grassi, G. & Pennington, D. (2019). *Mapping the Role of Raw Materials in Sustainable Development Goals. A preliminary analysis of links, monitoring indicators, and related policy initiatives*. Luxemburg. Download unter: [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112892/sustainable\\_development\\_goals\\_report\\_jrc112892.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112892/sustainable_development_goals_report_jrc112892.pdf) (Zugriff am 06.09.2019)

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L., Angerer, G., . . . Benecke, S. (2016). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Studie im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA)* Berlin. Download unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/dera-rohstoffinformationen-2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/dera-rohstoffinformationen-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=6) (Zugriff am 13.09.2019)

Mayer, A., Haas, W., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Nuss, P. & Blengini, G. A. (2019). Measuring progress towards a circular economy: a monitoring framework for economy-wide material loop closing in the EU28. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 62-76.

Meier, T. & Christen, O. (2013). Environmental impacts of dietary recommendations and dietary styles: Germany as an example. *Environ Sci Technol*, 47(2), 877-888.

Mostert, C., Ostrander, B., Bringezu, S. & Kneiske, T. M. (2018). Comparing Electrical Energy Storage Technologies Regarding Their Material and Carbon Footprint. *Energies*, 11(12), 3386.

Mudd, G. (2009). *The Sustainability of Mining in Australia – Key production trends and their environmental implications for the future. Research report RR5*. Download unter: [users.monash.edu.au/~gmudd/files/SustMining-Aust-Report-2009-Master.pdf](http://users.monash.edu.au/~gmudd/files/SustMining-Aust-Report-2009-Master.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

NABU (2019). Der naturverträgliche Ausbau der Photovoltaik. Forschungs- und Analysebedarf bei der Bewertung von Umweltauswirkungen. Download unter: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/energie/erneuerbare-energien-energiewende/solarenergie/04300.html> (Zugriff am 09.09.2019)

Norgate, T., Jahanshahi, S. & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15(8), 838-848.

Nuss, P. & Eckelman, M. (2014). Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PLoS One*, 9(7), e101298.

OECD (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences* Paris. Download unter: <https://www.oecd.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060-9789264307452-en.htm> (Zugriff am 06.09.2019)

Oehmichen, K., Klatt, S., Gerber, K., Polley, H., Röhling, S. & Dunger, K. (2018). *Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse*. Braunschweig. Download unter: <https://www.weham->



[szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Oehmichen\\_Die\\_alternativen\\_WEHAM-Szenarien\\_2018.pdf](https://www.szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Oehmichen_Die_alternativen_WEHAM-Szenarien_2018.pdf)  
(Zugriff am 09.09.2019)

Oei, P.-Y., Brautzsch, H.-U., Hermann, H., Herpich, P., Lünenbürger, B. & Schult, C. Coal phase-out in Germany – Implications and Policies for affected regions. Draft.

Öko-Institut, ifeu & Fraunhofer ISI (2018). *Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr – Handlungsempfehlungen für Deutschland*. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg. Download unter:  
<https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Thesen-Zukunft-StrGueterverkehr.pdf> (Zugriff am 27.09.2019)

Öko-Institut, Institut für Verkehrsforschung im DLR, ifeu & AG, I. (2016). *Endbericht Renewability III. Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors*. Berlin. Download unter: [http://www.renewability.de/wp-content/uploads/Renewability\\_III\\_Endbericht.pdf](http://www.renewability.de/wp-content/uploads/Renewability_III_Endbericht.pdf) (Zugriff am 27.09.2019)

Öko-Institut e.V. (2015). *Klimaschutzszenario 2050. Zusammenfassung des 2. Endberichts*. Download unter:  
<https://www.oeko.de/oekodoc/2441/2015-598-de.pdf> (Zugriff am 26.03.2019)

Parravicini, V., Svardal, K. & Krampe, J. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants. *Energy Procedia*, 97, 246-253.

Pérez-Rincón, M., Vargas-Morales, J. & Crespo-Marín, Z. (2018). Trends in social metabolism and environmental conflicts in four Andean countries from 1970 to 2013. *Sustainability Science*, 13(3), 635-648. Retrieved from  
<https://doi.org/10.1007/s11625-017-0510-9>.

Prognos AG, GWS & EWI (2014). *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12 Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie*. Basel. Download unter:  
[https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=7) (Zugriff am 19.09.2019)

Purr, K. (Producer). (2016). Power to Gas zur Dekarbonisierung des Energiesystems - Klimaziele nach COP21. 5. Jahreskonferenz der dena-Strategieplattform Power to Gas. Präsentation.

REN21 (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*. Paris. Download unter:  
[http://www.ren21.net/gsr\\_2018\\_full\\_report\\_en](http://www.ren21.net/gsr_2018_full_report_en) (Zugriff am 02.07.2019)

Ritthoff, M., Hanke, T., Biengen, K., Teubler, J., Saurat, M. & Bahn-Walkowiak, B. (2015). Synergien und Zielkonflikte zwischen Ressourcen- und Klimaschutz – Identifizierung von technischen Innovationen, systemischen Lösungen, Maßnahmen und Instrumenten an den Beispielen „Photovoltaik“ und „Gebäudesanierung“. unveröffentlichter Forschungsbericht des Wuppertal Instituts im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Rötzer, N. & Schmidt, M. (2018). Decreasing Metal Ore Grades—Is the Fear of Resource Depletion Justified? *Resources*, 7(4), 88.

Rüter, S., Stümer, W. & Dunger, K. (2017). Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien.

Rüttinger, L. & Scholl, C. (2017). *Verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung? Herausforderungen, Perspektiven, Lösungsansätze. Zusammenfassung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Ansätze zur Reduzierung von Umweltbelastung und negativen sozialen Auswirkungen bei der Gewinnung von Metallrohstoffen (UmSoRes)“*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 66/2017. Dessau-Roßlau. Download unter:  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-18\\_texte\\_66-2017\\_umsorress\\_zusamm.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-18_texte_66-2017_umsorress_zusamm.pdf) (Zugriff am 17.10.2019)

Santamarina, J. C., Torres-Cruz, L. A. & Bachus, R. C. (2019). Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science*, 364(6440), 526-528.

Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N., Steger, S., Schütz, H., Fernández, J. A., . . . Baumann, J. (2015). *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft*. Im Auftrag des

Umweltbundesamtes. Texte 83/2015. Dessau-Roßlau. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kartierung-des-anthropogenen-lagers-in-deutschland> (Zugriff am 02.07.2019)

Schmied, M., Wüthrich, P., Zah, R., Althaus, H.-J. & Friedl, C. (2015). *Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 30/2015. Dessau-Roßlau. Download unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_30\\_2015\\_postfossile\\_energieversorgungsoptionen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf) (Zugriff am 11.09.2019)

Scholwin, F., Grope, J., Clinkscales, A., Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., . . . Reinhold, G. (2018). *Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Text 41/2019. Dessau-Roßlau. Download unter:

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktuelle-entwicklung-perspektiven-der> (Zugriff am 19.09.2019)

Schulz, R., Knopf, S., Suchi, E. & Dittmann, J. (2013). *Geothermieatlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie. Endbericht*. Hannover. Download unter:

[https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication\\_data/final\\_reports/final\\_reports\\_data/Endbericht\\_Geothermie\\_Atlas.pdf](https://www.geotis.de/homepage/sitecontent/info/publication_data/final_reports/final_reports_data/Endbericht_Geothermie_Atlas.pdf) (Zugriff am 09.09.2019)

Schütz, S. & Härtel, P. (2016). *Klimaschutz und regenerativ erzeugte chemische Energieträger – Infrastruktur und Systemanpassung zur Versorgung mit regenerativen chemischen Energieträgern aus in- und ausländischen regenerativen Energien*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 08/2016. Dessau-Roßlau.

Download unter:

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_08\\_2016\\_klimaschutz\\_und\\_regenerativ\\_erzeugte\\_chemische\\_energietae.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_08_2016_klimaschutz_und_regenerativ_erzeugte_chemische_energietae.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)

Sea distances (2019). Sea distances. Download unter: <https://sea-distances.org/> (Zugriff am 27.09.2019)

Spohr, M. (2016). *Human Rights Risks in Mining. A Baseline Study*. Hannover. Download unter:

[https://www.bmz.de/rue/includes/downloads/BGR\\_MPFPR\\_2016\\_Human\\_Rights\\_Risks\\_in\\_Mining.pdf](https://www.bmz.de/rue/includes/downloads/BGR_MPFPR_2016_Human_Rights_Risks_in_Mining.pdf) (Zugriff am 17.10.2019)

Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., . . . Tukker, A. (2018). EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. *Journal of Industrial Ecology*, 22(3), 502-515.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2015). *Zensus 2011. Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland. Endgültige Ergebnisse*. Hannover. Download unter:

[https://www.zensus2011.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Aufsaeetze\\_Archiv/2015\\_12\\_NI\\_GWZ\\_endgueltig.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.zensus2011.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Aufsaeetze_Archiv/2015_12_NI_GWZ_endgueltig.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (Zugriff am 19.09.2019)

Statistisches Bundesamt (2008). *Verkehr NST-2007 Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik – 2007*. Wiesbaden. Download unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/nsz-2007.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/nsz-2007.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am 23.09.2019)

Statistisches Bundesamt (2010). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung*. Wiesbaden. Download unter:

[https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft\\_derivate\\_00004165/2030510107004.pdf](https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00004165/2030510107004.pdf) (Zugriff am 20.09.2019)

Statistisches Bundesamt (2012). *Verkehr. Seeschifffahrt*. Wiesbaden. Download unter:

[https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft\\_derivate\\_00012788/2080500127004\\_korr04082014.pdf](https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00012788/2080500127004_korr04082014.pdf) (Zugriff am 27.09.2019)

Statistisches Bundesamt (2015a). Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Download unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html) (Zugriff am 09.04.2019)

Statistisches Bundesamt (2015b). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung*. Wiesbaden. Download unter: [https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft\\_derivate\\_00029318/2030510157004.pdf](https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00029318/2030510157004.pdf) (Zugriff am 20.09.2019)

Statistisches Bundesamt (2017a). Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Aktualisierte Rechnung auf Basis 2015. Download unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html) (Zugriff am 16.04.2019)

Statistisches Bundesamt (2017b). Bodenfläche insgesamt nach Nutzungsarten in Deutschland. Download am 19.09.2019 unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-insgesamt.html>

Statistisches Bundesamt (2018a). Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten 2010 bis 2014. Download am 18.10.2019 unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Publikationen/Downloads-Material-und-Energiefluesse/rohstoffaequivalente-5853101149004.html>

Statistisches Bundesamt (2018b). *Nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Indikatorenbericht 2018*. Wiesbaden. Download unter: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001189004.pdf;jsessionid=5F53CAE9C151A395F084E38C18749E20.internet732?\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Publikationen/Downloads-Nachhaltigkeit/indikatoren-0230001189004.pdf;jsessionid=5F53CAE9C151A395F084E38C18749E20.internet732?_blob=publicationFile&v=6) (Zugriff am 11.05.2019)

Statistisches Bundesamt (2018c). Pressemitteilung Nr. 49/2018. Rohstoffeinsatz für Konsum und Investitionen 2014: 1,3 Milliarden Tonnen [Pressemitteilung]. Download unter: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/02/PD18\\_049\\_85.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/02/PD18_049_85.html)

Statistisches Bundesamt (2018d). Statistisches Jahrbuch 2018 - Kapitel 19 Land- und Forstwirtschaft. Download am 11.09.2019 unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.html>

Statistisches Bundesamt (2019a). *Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (WZ2008 2-/3-/4-Steller). Tabelle 42271-0002, abgerufen über GENESIS*.

Statistisches Bundesamt (2019b). Bodenfläche (Deutschland). Download am 06.02.2019 unter: [https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;sid=FFF4558B7872ED3855D21BCE90A44890.GO\\_1\\_1?operation=abruf\\_tabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1549467337920&auswahloperation=abruf\\_tabelleAuspraegungAuswahlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=33111-0001&auswahltext=&werteabruf=starten](https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;sid=FFF4558B7872ED3855D21BCE90A44890.GO_1_1?operation=abruf_tabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1549467337920&auswahloperation=abruf_tabelleAuspraegungAuswahlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=33111-0001&auswahltext=&werteabruf=starten)

Statistisches Bundesamt. (2019c). Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden. Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden. Lange Reihen ab 1969 - 2018. Retrieved from [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?_blob=publicationFile).

Statistisches Bundesamt (2019d). Materialflüsse in Millionen Tonnen. Download am 09.04.2019 unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Tabellen/material-energiefluesse.html>

Statistisches Bundesamt (2019e). *Statistische Wochenberichte. Bevölkerung und Arbeit - Monatszahlen*. Erschienen in der 26. Kalenderwoche 2019. Wiesbaden. Download unter:

[https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Statistische-Wochenberichte/wochenberichte-bevoelkerung-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=11](https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Statistische-Wochenberichte/wochenberichte-bevoelkerung-pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=11) (Zugriff am 16.04.2019)

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., . . . Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855.

Steger, S., Fekkak, M. & Bringezu, S. (2011). *Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspakets 2.3 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess)*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Wuppertal. Download unter:

<https://core.ac.uk/download/pdf/35139093.pdf> (Zugriff am 19.09.2019)

Sverdrup, H. & Ragnarsdottir, K. (2014). *Natural Resources in a Planetary Perspective* (Vol. 3).

Thünen Institut (2013). *Handlungsoptionen für den Klimaschutz in der deutschen Agrar- und Forstwirtschaft*.

Thünen Report 11. Braunschweig. Download unter: [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn052858.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn052858.pdf) (Zugriff am 02.10.2019)

Thünen Institut (2019). *Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft*. Thünen Report 65.

Braunschweig. Download unter: [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen\\_Report\\_65.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_65.pdf) (Zugriff am 02.10.2019)

Trapp, J. H., Petschow, U., Libbe, J., Birkmann, J. & Goris, A. (2018). *Notwendigkeiten und Ansatzpunkte einer klimaresilienten und zukunftsfähigen Ausgestaltung von Infrastrukturen - Rückschlüsse aus Extremereignisanalysen und aktuellen Infrastrukturplanungen*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter:

[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3714\\_48\\_101\\_anpassung\\_klima\\_wandel\\_teil\\_2\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3714_48_101_anpassung_klima_wandel_teil_2_bf.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

UBA. (1998). *Nachhaltiges Deutschland Wege zu einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung*. Berlin.

UBA (2007). *Die Nebenwirkungen der Behaglichkeit: Feinstaub aus Kamin und Holzofen*. Dessau-Roßlau

Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3556.pdf> (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2010). *Energieziel 2050. 100% Strom aus erneuerbaren Quellen*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel\\_2050.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2012). *Glossar zum Ressourcenschutz. Stand 17.1.2012*. Dessau-Roßlau. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/glossar-ressourcenschutz> (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2013a). *Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen*. Dessau-Roßlau.

Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale\\_landflaechen\\_bioma\\_sse\\_bf\\_klein.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_bioma_sse_bf_klein.pdf) (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2013b). *Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial\\_der\\_windenergie.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf) (Zugriff am 09.09.2019)

UBA (2014a). *Ammoniak*. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/ammoniak> (Zugriff am 07.10.2019)



UBA (2014b). *Innovative Techniken: Beste verfügbare Techniken (BVT) in ausgewählten industriellen Bereichen Teilvorhaben 3: Gießereien Vol. 3.* Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 82/2014. Dessau-Roßlau.

Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_82\\_2014\\_innovative\\_techniken\\_vol\\_3.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_82_2014_innovative_techniken_vol_3.pdf) (Zugriff am 30.09.2019)

UBA (2014c). *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.* Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 07/2014. Dessau-Roßlau. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0> (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2015a). *Landesgesetz zum Kohlendioxid-Speicherungsgesetz erarbeiten. Stellungnahme vom 28. Februar 2013 zum Antrag der Fraktionen DIE LINKE sowie BÜNDNIS 90/DIE RÜNEN im Landtag von Sachsen-Anhalt.*

Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/stellungnahme\\_des\\_umweltbundesamtes\\_landesgesetz\\_zum\\_kohlendioxid-speicherungsgesetz\\_erarbeiten.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/stellungnahme_des_umweltbundesamtes_landesgesetz_zum_kohlendioxid-speicherungsgesetz_erarbeiten.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2015b). *Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel.* Dessau-Roßlau.

Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2015> (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2015c). *ÖkoRess. Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des*

*Kritikalitätskonzeptes.* Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/umweltfragen-oekoress> (Zugriff am 17.10.2019)

UBA (2015d). *Pressemitteilung Nr. 46/2015. Tiefe Geothermie: Umweltrisiken beherrschbar* [Pressemitteilung].

Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/tiefe-geothermie-umweltrisiken-beherrschbar>

UBA (2015e). *Schwerpunkte 2015. Jahrespublikation des Umweltbundesamtes.* Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/schwerpunkte\\_2015.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/schwerpunkte_2015.pdf) (Zugriff am 17.10.2019)

UBA (2016a). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2014.* Dessau-Roßlau.

Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_23\\_2016\\_nir\\_2016berichterstattung\\_unter\\_der\\_klimarahmenkonvention.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_23_2016_nir_2016berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf) (Zugriff am 09.08.2019)

UBA (2016b). *Das anthropogene Lager.* Dessau-Roßlau. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/das-anthropogene-lager#textpart-1> (Zugriff am 17.10.2019)

UBA (2016c). *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050.* Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 72/2016. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10\\_endbericht\\_energieversorgung\\_des\\_verkehrs\\_2050\\_final.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf) (Zugriff am 13.09.2019)

UBA (2016d). *Getrennte Erfassung verbessern.* Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/stoffstrommanagement-im-bauwesen#textpart-3> (Zugriff am 23.09.2019)

UBA (2016e). *Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess.* Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position\\_power\\_to\\_gas-power\\_to\\_liquid\\_web.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf) (Zugriff am 09.10.2019)

UBA (2016f). *Klimaneutraler Gebäudebestand 2050*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 06/2016. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06\\_climate-change\\_26-2017\\_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-06_climate-change_26-2017_klimaneutraler-gebaeudebestand-ii.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

UBA (2016g). *Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung – Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutzplan\\_2050\\_der\\_bundesregierung\\_0.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutzplan_2050_der_bundesregierung_0.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2016h). Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#textpart-2> (Zugriff am 19.09.2019)

UBA (2017a). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2015*. Dessau-Roßlau.

Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-2> (Zugriff am 30.09.2019)

UBA (2017b). *Die Stadt für Morgen: Umweltschonend mobil – lärmarm – grün – kompakt – durchmischt*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/20170505\\_stadt\\_von\\_morgen\\_2\\_auflage\\_web.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/20170505_stadt_von_morgen_2_auflage_web.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2017c). *Tieffrequente Geräusche im Wohnumfeld. Ein Leitfaden für die Praxis*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/170313\\_uba\\_fb\\_tieffrequente\\_gerauesche\\_bf.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/170313_uba_fb_tieffrequente_gerauesche_bf.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

UBA (2017d). *Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba\\_broschuere\\_urbanmining\\_rz\\_screen\\_0.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf) (Zugriff am 13.09.2019)

UBA (2017e). Weltweite Temperaturen und Extremwetterereignisse seit 2010. Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chronik-weltweiter-temperaturen-niederschlaege> (Zugriff am 19.09.2017)

UBA (2018a). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016*. Dessau-Roßlau.

Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-3> (Zugriff am 07.10.2019)

UBA (2018b, 30.07.2018). Emissionen fluoriertener Treibhausgase („F-Gase“). Download unter:

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-fluoriert-er-treibhausgase-f-gase#textpart-1> (Zugriff am 09.04.2019)

UBA (2018c). *Klimaschutz und Abwasserbehandlung. Sinnvolle Beiträge zur Energiewende*. Dessau-Roßlau. Download unter:

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190111\\_uba\\_pos\\_klimaschutz\\_und\\_abwasserbehandlung\\_bf.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/190111_uba_pos_klimaschutz_und_abwasserbehandlung_bf.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2019a). *Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land*. (Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change (November)). Dessau-Roßlau.

UBA (2019b). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28\\_cc\\_23-2019\\_nir-2019\\_0.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28_cc_23-2019_nir-2019_0.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2019c). *Biogasanlagen: Sicherheitstechnische Aspekte und Umweltauswirkungen*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2019\\_04\\_10\\_uba\\_hg\\_biogas\\_anlagen\\_bf\\_300dpi.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2019_04_10_uba_hg_biogas_anlagen_bf_300dpi.pdf) (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2019d). CO2 Rechner. Download unter: [http://uba.co2-rechner.de/de\\_DE/](http://uba.co2-rechner.de/de_DE/) (Zugriff am 02.10.2019)

UBA (2019e). *Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten- 2. Auflage mit methodischen Anpassungen und Teilneuberechnung in Kapitel 2 und 3*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215\\_uba\\_fachbrosch\\_rtd\\_bf.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf) (Zugriff am 06.09.2019)

UBA (2019f). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10\\_cc\\_10-2019\\_strommix\\_2019.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf) (Zugriff am 06.09.2019)

UBA (2019g). *Environmental criticality of raw materials. Some facts & findings for policy-makers*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/plenary-1-4\\_okoressii\\_policymakers.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/plenary-1-4_okoressii_policymakers.pdf) (Zugriff am 18.10.2019)

UBA (2019h). *Flächensparen – Böden und Landschaften erhalten*. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten#textpart-1> (Zugriff am 19.09.2019)

UBA (2019i). Indikator: Nationaler Wohlfahrtsindex. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/indikator-nationaler-wohlfahrtsindex> (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2019j). *Kurzbewertung des Abschlussberichts der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (WSB)*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/kurzbewertung\\_des\\_abschlusssberichts\\_der\\_kommission\\_wachstum\\_strukturwandel\\_und\\_beschaeftigung.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/kurzbewertung_des_abschlusssberichts_der_kommission_wachstum_strukturwandel_und_beschaeftigung.pdf) (Zugriff am 10.05.2019)

UBA (2019k). *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2017*. Dessau-Roßlau. Download unter: (Zugriff am

UBA (2019l). Pressemitteilung Nr. 09/2019. Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen [Pressemitteilung]. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimabilanz-2018-45-prozent-weniger>

UBA (2019m). *Projektionsbericht 2019 für Deutschland – Zusammenfassung in der Struktur des Klimaschutzplans. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 (Politikszenerarien IX)“*. Dessau-Roßlau. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/projektionsbericht-2019-fuer-deutschland> (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2019n). *Stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft. Indikatoren* Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/sekundaerrohstoffwirtschaft-indikatoren#textpart-1> (Zugriff am 13.09.2019)

- UBA (2019o, 28.05.2019). Treibhausgas-Emissionen. Download unter:  
<http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> (Zugriff am 17.06.2019)
- UBA (2019p). *UBA-Kurzposition zur Kohlendioxid-Entnahme aus der Atmosphäre – Carbon Dioxide Removal (sogenannte „negative Emissionen“)*. Dessau-Roßlau. Download unter:  
[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/uba-kurzposition\\_zur\\_kohlendioxid-entnahme\\_aus\\_der\\_atmosphaere\\_2019.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/uba-kurzposition_zur_kohlendioxid-entnahme_aus_der_atmosphaere_2019.pdf) (Zugriff am 17.06.2019)
- UBA (2019q). *Umweltschonender Luftverkehr: lokal – national – internal (In Bearbeitung)*. Texte 130/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: (Zugriff am
- UBA (2019r). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Stand: August 2019*. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html) (Zugriff am 27.09.2019)
- UBA (Veröffentlichung in Planung-a). *13 Thesen für eine klimaneutralen Gebäudebestand*. Dessau-Roßlau.
- UBA (Veröffentlichung in Planung-b). *Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht*. Dessau-Roßlau.
- UBA (Veröffentlichung in Planung-c). *Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem*. Dessau-Roßlau.
- UBA auf Basis AG Energiebilanzen (2019). Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2018. Stand: 08/2019. (Zugriff am
- UNEP (2011). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel*. Nairobi. Download unter:  
<https://www.resourcepanel.org/file/400/download?token=E0TEjf3z> (Zugriff am 12.09.2019)
- UNEP (2013). *Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles. Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*. Download unter:  
<http://www.resourcepanel.org/file/364/download?token=hYEpbJx2> (Zugriff am 02.07.2019)
- UNEP (2016). *Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production. Report of the International Resource Panel*. Nairobi. Download unter: (Zugriff am
- UNEP (2019a). Global Resources Outlook. 2019: Natural Resources for the Future We Want. Download unter:  
<https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook> (Zugriff am 16.09.2019)
- UNEP (2019b). UN Environment International Resource Panel Global Material Flows Database. Download am 09.04.2019 unter: <http://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>
- UNFCCC (2010). *The Cancun Agreements: Outcome of the work of the Ad Hoc Working. Decision 1/CP.16, para 45. Document FCCC/CP/2010/7/Add.1*. Paris. Download unter: [www.unfccc.int](http://www.unfccc.int) (Zugriff am 10.07.2019)
- UNFCCC (2015). *Paris Agreement*. Paris. Download unter:  
[https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf) (Zugriff am 02.09.2019)
- UNFCCC (2019). Paris Agreement - Status of Ratification. Download unter: <https://unfccc.int/process/the-paris-agreement/status-of-ratification> (Zugriff am 16.09.2019)
- Universität Leiden (2019). CML-IA Characterisation Factors. Download am 18.10.2019 unter:  
<https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- USGS (2016). Lithium. Download unter: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/lithium/myb1-2016-lithi.pdf> (Zugriff am 13.09.2019)



- USGS (2019). Minerals Yearbook - Metals and Minerals. Download unter: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/minerals-yearbook-metals-and-minerals> (Zugriff am 13.09.2019)
- Utopia Team (2019). Die 12 Elektroautos mit der größten Reichweite 2019. Download unter: <https://utopia.de/ratgeber/elektroautos-groesste-reichweite-top-modelle/> (Zugriff am 30.09.2019)
- Van der Voet, E., Van Oers, L., Verboon, M. & Kuipers, K. (2019). Environmental Implications of Future Demand Scenarios for Metals: Methodology and Application to the Case of Seven Major Metals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 141-155.
- van Kamp, I. & van den Berg, F. (2018). Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound. *Acoustics Australia*, 46(1), 31-57.
- VCI (2019). Rohstoffbasis der chemischen Industrie - Daten und Fakten. Download unter: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-der-chemischen-industrie.pdf> (Zugriff am 30.09.2019)
- VDI (2018). VDI-Richtlinie 4800-1. Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien. Download unter: [https://www.vdi.de/uploads/tx\\_vdirili/pdf/1551920.pdf](https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1551920.pdf) (Zugriff am 02.07.2019)
- VDI ZRE (2016). Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. Download unter: [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/2014-Kurzanalyse-03-VDI-ZRE-CFK.pdf) (Zugriff am 30.09.2019)
- vdp. (2019). Leistungsbericht Papier 2019. Die Papierindustrie in Zahlen. National und international. Retrieved from <https://www.vdp-online.de/test-and-review/internal-demo/pages/showroom-advance/news/read/article/leistungsbericht-papier-2017.html>.
- von Koerber, K. & Kretschmer, J. (2009). Ernährung und Klima. Nachhaltiger Konsum ist ein Beitrag zum Klimaschutz. In *Der kritische Agrarbericht 2009* (pp. 280-285). Konstanz: ABL Verlag.
- Wachsmuth, J., Eckstein, J. E., Held, A., Herbst, A., Plötz, P., Bettgenhäuser, K., . . . Sosa, A. A. (2019). *Assessment of the In-depth Analysis accompanying the Strategic Vision "A clean planet for all" of the European Commission. Interim Report*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change. Dessau-Roßlau. Download unter: [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-5461729.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5461729.pdf) (Zugriff am 10.10.2019)
- Wachsmuth, J., Michaelis, J., Neumann, F., Wietschel, M., Duscha, V., Degünther, C., . . . Zubair, A. (2019). *Roadmap Gas für die Energiewende – Nachhaltiger Klimabeitrag des Gassektors*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 12/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15\\_cc\\_12-2019\\_roadmap-gas\\_2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-15_cc_12-2019_roadmap-gas_2.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)
- Wachsmuth, J., Schaeffer, M. & Hare, B. (2018). *The EU long-term strategy to reduce GHG emissions in light of the Paris Agreement and the IPCC SR1.5. Working Paper S22/2018 Sustainability and Innovation*. Karlsruhe. Download unter: [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP22-2018\\_The\\_EU\\_long-term\\_strategy\\_to\\_reduce\\_GHG\\_emissions\\_WAJ.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/sustainability-innovation/2018/WP22-2018_The_EU_long-term_strategy_to_reduce_GHG_emissions_WAJ.pdf) (Zugriff am 12.09.2019)
- WBAE & WBW (2016). *Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Gutachten*. Berlin. Download unter: [https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/Klimaschutzgutachten\\_2016.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/Klimaschutzgutachten_2016.pdf?__blob=publicationFile) (Zugriff am 02.10.2019)
- Wiesen, K., Samadi, S., Saurat, M., Zelt, O., Suski, P., Taubitz, A., . . . Viebahn, P. (2017). *Analyse des Rohstoffaufwandes der Energieinfrastruktur in Deutschland*. Wuppertal.

Wietschel, M., Gnann, T., Kühn, A., Plötz, P., Moll, C., Speth, C., . . . Mader, S. (2017). *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw*. Karlsruhe. Download unter: [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-4457615.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4457615.pdf) (Zugriff am 19.09.2019)

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2019). Statistiken. Download unter: <https://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/3/> (Zugriff am 13.09.2019)

World Bank (2004). *Striking a better balance : the World Bank Group and extractive industries - the final report of the extractive industries review*. Download unter: <http://documents.worldbank.org/curated/en/961241468781797388/Striking-a-better-balance-the-World-Bank-Group-and-extractive-industries-the-final-report-of-the-extractive-industries-review> (Zugriff am 18.10.2019)

ZSW (2014). *Vorhaben II c Solare Strahlungsenergie*. Stuttgart. Download unter: <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erfahrungsbericht-evaluierung-eeg-2014-2c.html> (Zugriff am 09.09.2019)

ZSW (2019). *Untersuchung im Rahmen des Fachloses 4 zu Solare Strahlungsenergie – EEG-Erfahrungsbericht. Stand: 29.03.2019*. Stuttgart. Download unter: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi\\_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/zsv-boschundpartner-vorbereitung-begleitung-eeg.html) (Zugriff am 19.09.2019)



