

CLIMATE CHANGE

02/2020

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate

Abschlussbericht

CLIMATE CHANGE 02/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 41 115 0
FB000439/2

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate

Abschlussbericht

von

Dr. Monika Dittrich, Frank Dünnebeil, Susanne Köppen,
Dr. Amany von Oehsen, Regine Vogt, Dr. Kirsten
Biemann, Horst Fehrenbach, Birte Ewers, Sonja
Limberger
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Norman Gerhardt, Dr. Sarah Becker, Dr. Diana Böttger,
Felix Frischmuth
IEE – Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik, Kassel


Dr. Karl Schoer
SSG, Wiesbaden


Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

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

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

Durchführung der Studie:

Ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

September 2020

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 „Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie“
Katja Purr

Fachgebiet I 1.1 „Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,
Ressourcenschonung“
Jens Günther

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes

„RESCUE“ (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität) ist ein interdisziplinäres Projekt des Umweltbundesamtes (UBA) mit einem hohen Anteil an „Eigenforschung“ des UBA und einer intensiven Einbindung externer Wissenschaftler. Folgende Publikationen sind Stand November 2020 hierzu erfolgt und ergänzen sich:

UBA (2017): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf; 2. Auflage erschien 2019 (verfügbar in Deutsch und Englisch)

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Biemann, K., von Oehsen, A.; Mellwig, P., Neumann, K., Gerhardt, N., Sschoer, K. (2017): Konsistenz im Modellverbund im Projekt RTD. In: Sicherung der Konsistenz und Harmonisierung von Annahmen bei der kombinierten Modellierung von Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen. UBA-Domunetationen 04/2017, S. 83-96.

Günther, J.; Lehmann, H.; Lorenz, U.; Pfeiffer, D.; Purr, K. (2018): Towards a Resource Efficient and Greenhouse Gas Neutral Germany 2050. In: Factor X: Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources (Lehmann H., ed.), pp. 417-425. Springer International Publishing, Cham. ISBN: 978-3-319-50079-9. DOI: 10.1007/978-3-319-50079-9_30

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf.

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Kurzfassung. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_dt.pdf (verfügbar in Deutsch und Englisch)

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: Executive Summary der RESCUE-Studie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_wege_in_ress_treibhausgasneutralitaet_11-11-2019_bf.pdf (verfügbar in Deutsch und Englisch)

UBA (2019): Erneuerbare Energien für ein treibhausgasneutrales Deutschland. Politikpapier zur RESCUE-Studie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_erneuerbareenergien_treibhausneutdt_11-11-2019_bf.pdf

UBA (2019): Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2050. Politikpapier zur RESCUE-Studie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_treibhausgas_2050_11-11-2019_bf.pdf (verfügbar in Deutsch, Englisch und Chinesisch)

Günther, J.; Nuss, P.; Purr, K.; Dittrich, M., Lehmann, H. (2020): Pathways to a resource-efficient and greenhouse-gas -neutral Germany. In: Lehmann, H. (2020): Sustainable Development and Resource Productivity - The Nexus Approaches. Routledge Publishing. ISBN 9780367429546

Dittrich, M., Schoer, Günther, J., Nuss, P., Purr, K., K., Lehmann, H. (2020): Resource Use in a Post-fossil Green Germany. In: Lehmann, H. (2020): Sustainable Development and Resource Productivity - The Nexus Approaches. Routledge Publishing. ISBN 9780367429546

Lorenz, U. (2020): Systemic analysis of the nexus of greenhouse gas emissions and material use in the energy sector. In: Lehmann, H. (2020): Sustainable Development and Resource Productivity - The Nexus Approaches. Routledge Publishing. ISBN 9780367429546

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. UBA Climate Change 01/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe. UBA Climate Change 03/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife. UBA Climate Change 04/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. UBA Climate Change 05/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Vergleich der Szenarien. UBA Climate Change 06/2020.

Kurzbeschreibung

Das Umweltbundesamt (UBA) untersucht schon seit vielen Jahren, wie eine nachhaltige Entwicklung sowie eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Lebensweise erreicht werden kann. Hierfür wurde ein interdisziplinäres Projekt gestartet: „RESCUE“ (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität). Dieses Projekt ist mit einem hohen Anteil an „Eigenforschung“ des UBA und einer intensiven Einbindung externer Wissenschaftler über das hier berichtete Forschungsvorhaben (FKZ 3715411150) gelungen. Dabei wurden sechs Szenarien zur Transformation entwickelt. Die Green-Szenarien beschreiben unterschiedlich ambitionierte Transformationspfade zu einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland bis 2050.

Das Szenario GreenLate („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Late transition“), zeichnet einen möglichen Transformationspfad Deutschlands als weiterhin exportorientierten Industriestandort mit einer modernen leistungsfähigen Gesellschaft auf. Das Szenario wird durch insgesamt steigende Produktionskapazitäten und weiterhin eine auf Exporte orientierte Produktion in Deutschland charakterisiert. GreenLate verdeutlicht, welche Herausforderungen verspätetes Handeln bei der Erreichung einer THG-Minderung um 95 % bis 2050 mit sich bringt. 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. Das Szenario liegt damit am Rand des Zielkorridors der Bundesregierung, welche aber nicht kompatibel zu einer europäischen Klimazielschärfung im Rahmen des European Green Deals für die gemeinschaftliche Einhaltung eines „deutlich unter 2°C“-Ziels ist. GreenLate stellt ein Szenario der geringen „Elektrifizierung“ und des „verspäteten Handelns“ bei Innovationen und Umsetzung dar. 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. In Summe resultiert ein höherer Energiebedarf und langfristig ein höherer Ausbaubedarf an erneuerbaren Energien und PtG/L-Importen. Damit sowie mit der im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien weniger ressourceneffizienten Transformation geht eine höhere Nachfrage nach Rohstoffen im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien einher, im Vergleich zu heute sinkt die Primärrohstoffnachfrage (RMC) um 56,1 %.

Abstract

outlines a possible transformation path for Germany as an export-oriented industrial country with a modern and competitive society. The scenario is characterised by an overall increase in production capacities and continued export-oriented production in Germany. GreenLate illustrates the challenges of delayed action to achieve a GHG reduction of 95 % by 2050. Another important characteristic of GreenLate is that although a greenhouse gas reduction of 55 % compared to 1990 will be achieved in 2030, but that further a significant increase in climate protection measures and technological innovations will only take place in the decade after 2040 in order to achieve a greenhouse gas reduction of at least 95 % by 2050. The scenario is still on the edge of the Federal Government's target corridor, but is not compatible with a European tightening of the climate targets within the framework of the European Green Deal to reach together a "significantly below 2°C" target. GreenLate represents a scenario of low "electrification" and "delayed action" in innovation and implementation. Thus, GreenLate will also use conventional technologies in the long term, such as combustion engines for road transport or gas combustion technologies. Energy-efficient technologies, such as electromobility and power to heat, are less integrated. In sum, this results in a higher energy consumption and, in the long term, in a higher need of renewable energies and Power-to-X (PtX) imports. This, together with the less resource-efficient transformation compared to the other Green Scenarios,

is accompanied by a higher demand for raw materials compared to the other Green Scenarios. Compared to today, the demand for primary raw materials (RMC) drops by 56.1 %.

Inhaltsverzeichnis

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis.....	14
Abkürzungsverzeichnis.....	18
Zusammenfassung.....	21
Summary	30
1 Einleitung.....	39
1.1 Herausforderung Klimawandel und die GreenSzenarien	39
1.2 GreenLate: Leitlinien und Ausrichtung	40
1.3 Aufbau des Berichts	42
2 Methodik	44
3 Allgemeine Annahmen	45
3.1 Rahmendaten.....	45
3.1.1 Bevölkerungsentwicklung	45
3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung	45
3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz.....	45
3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt	46
3.1.5 Nutzung von Biomasse.....	46
3.1.6 CCS und CCU	46
3.2 Emissionsziel 2030 und 2040	47
4 Sektorale Annahmen	48
4.1 Landwirtschaft	48
4.2 Flächennutzung und LULUCF	49
4.3 Industrie	50
4.3.1 Stahlindustrie	50
4.3.2 Nicht-Eisen -Metallindustrie	52
4.3.3 Gießereiindustrie	53
4.3.4 Chemische Industrie	54
4.3.5 Zementindustrie.....	55
4.3.6 Kalkindustrie	56
4.3.7 Glasindustrie	57
4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie	58
4.3.9 Nahrungsmittelindustrie.....	58

4.3.10	Textilindustrie	59
4.3.11	F-Gase und sonstige THG-Emissionen	60
4.3.12	Fahrzeugbau.....	60
4.4	Abfall und Abwasser	60
4.5	Gebäude.....	61
4.5.1	Entwicklung des Gebäudewärmeverbrauchs	62
4.5.1.1	Entwicklungen von Wohn- und Nutzflächen in GreenLate.....	62
4.5.1.2	Entwicklung von Sanierungsraten und –tiefen.....	63
4.5.1.3	Annahmen zu Innentemperaturen und Nutzerverhalten	63
4.5.1.4	Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlagen	63
4.5.1.5	Resultierender Nutz- und Endenergiebedarf im Zielpunkt 2050.....	63
4.5.2	Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes	67
4.5.3	Optimierung der Wärmebereitstellung	69
4.5.3.1	Optimierung der Wärmebereitstellung in Wärmenetzen	69
4.5.3.2	Objektversorgung	70
4.5.4	Weitere rohstoffbezogenen Annahmen im Hochbau.....	71
4.6	Verkehr.....	72
4.6.1	Vermeidung und Verlagerung im nationalen Personenverkehr.....	72
4.6.2	Entwicklung der Pkw-Flotten	73
4.6.3	Verlagerung im nationalen Güterverkehr.....	74
4.6.4	Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr	75
4.6.5	Internationaler Verkehr	76
4.7	Weitere Sektoren	76
4.7.1	Tiefbau	76
4.7.2	Stromleitungen	76
4.7.3	Straßenbau.....	77
4.8	Energieversorgung	77
4.8.1	Festlegung verschiedener Parameter	77
4.8.2	Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik	78
4.8.3	Markthochlauf von PtG/L und Zuordnung auf Anwendungsbereiche.....	78
4.8.4	Herkömmlicher Stromverbrauch	78
4.8.5	Biomassenutzung.....	79
4.8.6	Sonstige Rest- und Abfallströme.....	80
5	Ergebnisse	82

5.1	Energie	82
5.1.1	Endenergiebedarfe	82
5.1.2	Stromsektor	83
5.1.2.1	Strombilanz in Deutschland	83
5.1.2.2	Installierte Leistungen in Deutschland	85
5.1.3	Wärmesektor	88
5.1.3.1	Gebäudewärme Haushalte und GHD.....	88
5.1.3.2	Prozesswärme Industrie und GHD sowie Industriegebäude	90
5.1.4	Verkehrssektor.....	91
5.1.5	Gas- und PtL-Versorgung	93
5.1.6	Europäischer Rahmen	96
5.1.6.1	Strombilanz	96
5.1.6.2	Installierte Leistungen	97
5.2	Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen.....	98
5.2.1	Übersicht über die Entwicklung aller THG-Emissionen	98
5.2.2	THG-Emissionen nach Quellgruppen	100
5.2.2.1	THG-Emissionen im Energiesektor einschließlich nationaler Verkehr	100
5.2.2.2	THG-Emissionen der Industrie	101
5.2.2.3	THG-Emissionen der Landwirtschaft	102
5.2.2.4	THG-Emissionen der Abfallwirtschaft.....	103
5.2.2.5	THG-Emissionen LULUCF (ohne Wald)	104
5.2.3	THG-Emissionen einschließlich Vorketten	104
5.2.4	Kumulierte THG-Emissionen	106
5.2.5	Vergleich der Treibhausgase mit dem GreenEe1-Szenario	107
5.3	Rohstoffanspruchnahme.....	108
5.3.1	Der gesamtwirtschaftliche Konsum von Primärrohstoffen	108
5.3.1.1	Der Konsum von Primärrohstoffen nach Rohstoffarten.....	108
5.3.1.2	Die Veränderung der Rohstoffproduktivität.....	111
5.3.1.3	Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum in 2050.....	113
5.3.1.4	Der Primärrohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfeldern in 2050	114
5.3.1.5	Der kumulierte Primärrohstoffkonsum	117
5.3.1.6	Substitution von Primärrohstoffen	117
5.3.2	Rohstoffkonsum ausgewählter Rohstoffe	118

5.3.2.1	Primär- und Sekundäreinsatz von Eisen, Kupfer und Aluminium.....	118
5.3.2.2	Inanspruchnahme ausgewählter Technologie- und Edelmetalle	120
5.3.2.3	Die Inanspruchnahme von Primärholz	121
5.3.2.4	Die Inanspruchnahme von Sand, Kies und Schotter	122
5.3.2.5	Mögliche Knappheit von Rohstoffen	122
5.3.2.6	Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe1	124
5.4	Flächennutzung.....	125
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	127
7	Quellenverzeichnis	131
A	Anhang	133

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verlauf der bewohnten Wohnfläche im GreenLate	62
Abbildung 2:	Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLate – Endenergie	64
Abbildung 3:	Unterteilung der Nichtwohngebäude 1 in Effizienzklassen in GreenLate – Endenergie	65
Abbildung 4:	Unterteilung der Nichtwohngebäude 2 in Effizienzklassen in GreenLate – Endenergie	65
Abbildung 5:	Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLate – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen	66
Abbildung 6:	Unterteilung der Nichtwohngebäude 1 in Effizienzklassen in GreenLate – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen	66
Abbildung 7:	Unterteilung der Nichtwohngebäude 2 in Effizienzklassen in GreenLate – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen	67
Abbildung 8:	Simulierte Marktanteile von Heizungstechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in GreenLate – Obergrenze für Wärmepumpen (so schnell wie möglich) aus GEMOD als Input für SCOPE	68
Abbildung 9:	Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLate	82
Abbildung 10:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLate	84
Abbildung 11:	Installierte Leistungen Deutschland in GreenLate	86
Abbildung 12:	Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050 in GreenLate	87
Abbildung 13:	Entwicklung der Wärmenachfrage in GreenLate	88
Abbildung 14:	Deckung der Wärmenachfrage in GreenLate	89
Abbildung 15:	zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD- Prozesswärme – GreenLate	90
Abbildung 16:	zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme – GreenLate	91
Abbildung 17:	Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und Versorgung in GreenLate	93
Abbildung 18:	Notwendiger Markthochlauf für eine PtG/L-Import- Infrastruktur in GreenLate	94
Abbildung 19:	zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe) – GreenLate	95
Abbildung 20:	Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert)	96
Abbildung 21:	Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLate ...	97

Abbildung 22:	Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLate	97
Abbildung 23:	Installierte Leistungen Europa 2050 in GreenLate	98
Abbildung 24:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050.....	99
Abbildung 25:	THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte.....	105
Abbildung 26:	THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung	106
Abbildung 27:	Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050	107
Abbildung 28:	Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050...	110
Abbildung 29:	Letzte inländische Verwendung der Basis- und Technologie- bzw. Edelmetalle, 2010 bis 2050	111
Abbildung 30:	Der Verlauf ausgewählter Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050	112
Abbildung 31:	Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität in jahresdurchschnittlichen Veränderungen.....	113
Abbildung 32:	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person in 2010, 2030, 2040 und 2050.....	114
Abbildung 33:	Der RMC nach Verwendungskategorien, 2010 und in 2050 ..	115
Abbildung 34:	Der Konsum der privaten Haushalte nach Bedürfnisfeldern, 2010 und 2050.....	116
Abbildung 35:	Kumulierter Primärrohstoffkonsum (LIV), 2010 bis 2050	117
Abbildung 36:	Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 bis- 2050	118
Abbildung 37:	Primär- und Sekundärbasismetallmengen in der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis- 2050	120
Abbildung 38:	Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018	123
Abbildung 39:	Kumulierte Nachfrage ausgewählter Rohstoffe als Anteil der Reserven in 2018	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich.....	40
Tabelle 2:	Annahme zur Bevölkerungsentwicklung	45
Tabelle 3:	Energetische Nutzung der Biomassepotenziale bis 2050.....	46
Tabelle 4:	Entwicklung der Viehbestände im GreenLate-Szenario	49
Tabelle 5:	Annahmen Stahlindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	51
Tabelle 6:	Annahmen NE-Metallindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	52

Tabelle 7:	Annahmen Gießereiindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	53
Tabelle 8:	Annahmen chemische Industrie im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien	55
Tabelle 9:	Annahmen Zementindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	55
Tabelle 10:	Annahmen Kalkindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	56
Tabelle 11:	Annahmen Glasindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	57
Tabelle 12:	Annahmen Zellstoff- und Papierindustrie im GreenLate-Szenario gegenüber GreenEe1	58
Tabelle 13:	Annahmen Nahrungsmittelindustrie im GreenLate-Szenario gegenüber GreenEe1	59
Tabelle 14:	Annahmen Textilindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario	59
Tabelle 15:	Annahmen Abfall und Abwasser im GreenLate- gegenüber dem GreenEe-Szenario	60
Tabelle 16:	Überblick Annahmen im Gebäudewärmebereich GreenLate im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien	61
Tabelle 17:	Sanierungsniveaus bei Gebäuden ohne Dämmrestriktionen...	63
Tabelle 18:	Modellierter Nutzenergie- und Endenergiebedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden 2050	64
Tabelle 19:	Maximales Versorgungspotenzial der Wärmenetzversorgung in 2050 als Input für SCOPE	70
Tabelle 20:	Anteil von Wärmenetzen und JAZ (gemittelter Wert für TWW und RW) von Wärmepumpen in 2050 je Gebäudetyp in GreenLate	71
Tabelle 21	Materialmengen für Dämmungen einschließlich energetischer Sanierungen [Tsd. Tonnen].....	72
Tabelle 22:	Annahmen Personenverkehrsleistung im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien.....	72
Tabelle 23:	Nationale Personenverkehrsleistungen in GreenLate und den GreenEe-Szenarien	73
Tabelle 24:	Annahmen Pkw-Flotten im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien	73
Tabelle 25:	Nationale Güterverkehrsleistungen im GreenLate gegenüber den GreenEe2	74
Tabelle 26:	Annahmen Lkw-Flotten im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien	75
Tabelle 27:	Annahmenüberblick zur Energieversorgung in GreenLate im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien	77

Tabelle 28:	Klassischer Stromverbrauch GreenLate im Vergleich zu GreenEe1	79
Tabelle 29:	Stromerzeugung in GreenLate im Vergleich zu GreenEe1	79
Tabelle 30:	Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industriellen Reststoffen) in GreenLate im Vergleich zu GreenEe1	80
Tabelle 31:	Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien	80
Tabelle 32:	Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenLate im Vergleich mit GreenEe.....	81
Tabelle 33:	Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenLate im Vergleich zur Summe in GreenEe1.	83
Tabelle 34:	Nettostromverbrauch zzgl. Verluste in GreenLate und in GreenEe1	84
Tabelle 35:	Nettostromerzeugung in GreenLate und in GreenEe1.....	85
Tabelle 36:	Markthochlauf Wind-Onshore und PV	87
Tabelle 37:	Installierte Leistungen in GreenLate und in GreenEe1.....	88
Tabelle 38:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung	89
Tabelle 39:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung.....	90
Tabelle 40:	EEV nach Verkehrsmitteln	91
Tabelle 41:	EEV nach Energieträgern	92
Tabelle 42:	Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenLate und in GreenEe1	94
Tabelle 43:	Entwicklung der PtG/L-Importmengen in GreenLate.....	95
Tabelle 44:	Emissionsminderungen GreenLate in 2030 und 2050 gegenüber 1990.....	99
Tabelle 45:	Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO ₂ Äq	100
Tabelle 46:	Prozessbedingte THG-Emissionen nach Industriesektoren in t CO ₂ Äq	101
Tabelle 47:	THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO ₂ Äq	102
Tabelle 48:	THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO ₂ Äq	102
Tabelle 49:	THG-Emissionen Sektor Landwirtschaft im GreenLate-Szenario in t CO ₂ Äq	103
Tabelle 50:	THG-Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen im GreenLate-Szenario Szenario in t CO ₂ Äq ..	103
Tabelle 51:	THG-Emissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO ₂ Äq	103
Tabelle 52:	Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO ₂ Äq	104
Tabelle 53:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenLate und GreenEe in Tsd. Tonnen CO ₂ Äq.....	107

Tabelle 54:	Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010 und 2050 in Rohstoffäquivalenten (RME)108
Tabelle 55:	Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050121
Tabelle 56:	Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien.....121
Tabelle 57:	RMC in GreenLate und GreenEe1 im Vergleich.....125
Tabelle 58:	Flächennutzung in Deutschland in 2030, 2040 und 2050126

Abkürzungsverzeichnis

ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
BEV	Battery Electric Vehicle - Elektrofahrzeug
bevOH-Lkw	Oberleitungs-Lkw mit zusätzlichem Batteriespeicher (rein elektrischer Betrieb)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CBA	Cost-benefit analysis
CBA	Cost-benefit analysis
CCS	Carbon Capture and Storage – Kohlenstoffsammlung und Lagerung
CCU	Carbon Capture and Use – Kohlenstoffsammlung und Nutzung
CO₂	Kohlendioxid
CO₂Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
CH₄	Methan
C_{syn}	synthetisch erzeugter Kohlenstoff
DE	Domestic Extraction – heimische Rohstoffentnahme
Destatis	Statistisches Bundesamt
DMI	Domestic Material Input – heimischer Materialinput
EBS	Ersatzbrennstoff
EFH	Einfamilienhäuser
EGS	Ecosystem Goods and Services
EST	Eisen-, Stahl- und Temperguss
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GEMOD	Gebäude-Modell
Ggü.	Gegenüber
GreenEe	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Energy Efficiency
GreenLate	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Late Transition
GreenLife	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Lifestyle Changes
GreenMe	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Material Efficiency
GreenSupreme	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Minimierung von Treibhausgas-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum
GW	Gigawatt
GWP	Großwärmepumpe
HELCOM	Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protec

	tion of the Marine Environment of the Baltic Sea Area).
JAZ	Jahresarbeitszahl
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KSP	Klimaschutzplan
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LULUCF	Land use, land use change and forestry – Landnutzung, Landnutzungswandel und Forstwirtschaft
MBA	Mechanisch-biologische Behandlungsanlage
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierungsanlage
MFH	Mehrfamilienhäuser
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NEP	Netzentwicklungsplan
NZL	Neuzulassung
OH-LKW	Oberleitungs-Lastkraftwagen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle - extern aufladbares Hybridelektrofahrzeug
PGM	Platingruppenmetalle
Pkm	Personenkilometer
Ppm	Pars per million – Anteil pro Million
PtG	Power-to-Gas - auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige Kraftstoffe wie Wasserstoff oder Methan
PtL	Power-to-Liquid, auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte Flüssigkraftstoffe
PV	Photovoltaik
RESCUE	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität
RMC	Raw Material Consumption – Rohmaterialkonsum
RME	Raw Material Equivalents – Rohmaterialäquivalente
RMI	Raw Material Input – Rohmaterialinput
RW	Raumwärme
SCOPE	Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems
THG	Treibhausgase
THGND	Treibhausgasneutrales Deutschland (UBA-Publikation von 2014)
Tkm	Tonnenkilometer

TWh	Terrawattstunden
TREMOD	Transport-Emissions-Modell
UBA	Umweltbundesamt
URMOD	Umweltökonomisches Treibhausgas- und Rohstoffmodell
WEA	Windenergieanlagen
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ZFH	Zweifamilienhäuser

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Der Klimawandel ist eine zentrale Herausforderung der Gegenwart. Die Staatengemeinschaft, darunter Deutschland, bekennt sich dazu, den Temperaturanstieg auf unter 2 Grad zu begrenzen. Dies bedeutet, dass Deutschland den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant reduzieren und eine weitestgehende Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitestgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden (ohne zusätzliche THG-Emissionen durch LULUCF ohne Wald oder mögliche negative THG-Emissionen durch Wald wie Extensivierung und Holznutzung). Eine Reduktion in dem Ausmaß ist nur möglich, wenn die THG-Emissionen in allen Sektoren verringert werden und die Energieversorgung, die Einfluss auf alle Bereiche der Wirtschaft hat, grundlegend verändert wird. Darüber hinaus müssen auch alle natürlichen Ressourcen viel sparsamer als heute in allen Bereichen der Wirtschaft eingesetzt werden. Hier setzt das Projekt RESCUE (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität) an und untersucht folgende Fragestellungen:

1. Welche weiteren Optionen bestehen, um in 2050 eine mindestens 95 %ige Minderung von Treibhausgasemissionen zu erreichen?
2. Wie kann bzw. muss der Weg dorthin gestaltet werden?
3. Welcher Rohstoffkonsum ist mit den Transformationswegen verbunden?

Zur Beantwortung der Fragen wurden in enger Zusammenarbeit zwischen dem Umweltbundesamt und der Autorenschaft insgesamt sechs Szenarien entworfen, die unterschiedliche Ambitionsniveaus und Veränderungsgeschwindigkeiten beinhalten. Die folgende Tabelle Z-1: zeigt die Green-Szenarien und ihre jeweiligen Ambitionsniveaus im Vergleich. Das Umweltbundesamt hat auf den Arbeiten dieses Projektes aufbauend auch entsprechende Publikationen erstellt, siehe www.uba.de/rescue-projekt. Dieser Bericht dokumentiert das Szenario Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Late transition, kurz: GreenLate.

Tabelle Z-1: Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich

	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Energieeffizienz	Sehr hoch		Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Materialeffizienz	Hoch		Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Technikinnovation	Hoch		Gering	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Nachhaltiges Handeln	Mittel		Sehr gering	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Wachstumsbefreiung	Mittel		Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Ausgleich des globalen Technologieniveaus	Niedrig		Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Verringerung der Flächenneuersiegelung	Hoch		Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Klimaschutzbestreben im Pfad	Hoch		Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch

Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von (UBA 2019a)

Ausrichtung des Szenarios GreenLate

Die Ausrichtung des Szenarios GreenLate wird sehr präzise in UBA (2019a) definiert: GreenLate ("Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Late transition"), zeichnet einen 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, erneuerbar 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 zum großen Teil 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 erneuerbaren 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 THG-Emissionen darstellen, 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 verstärkte Umsetzung von Verkehrsvermeidung und -verlagerung über den heutigen Trend hinaus erfolgt erst am Ende der ersten Jahrhunderthälfte. Gleichmaßen 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 erst verzögert angegangen werden. Dementsprechend ist der Schwerlastverkehr 2050 von Verbrennungskraftmaschinen geprägt. Die Kombination aus dem Festhalten an konventionellen Techniken, geringerem Fortschritt in effizientere Antriebstechniken und geringer Verkehrsvermeidung und -verlagerung führt zu hohen erneuerbaren Kraftstoffbedarfen.

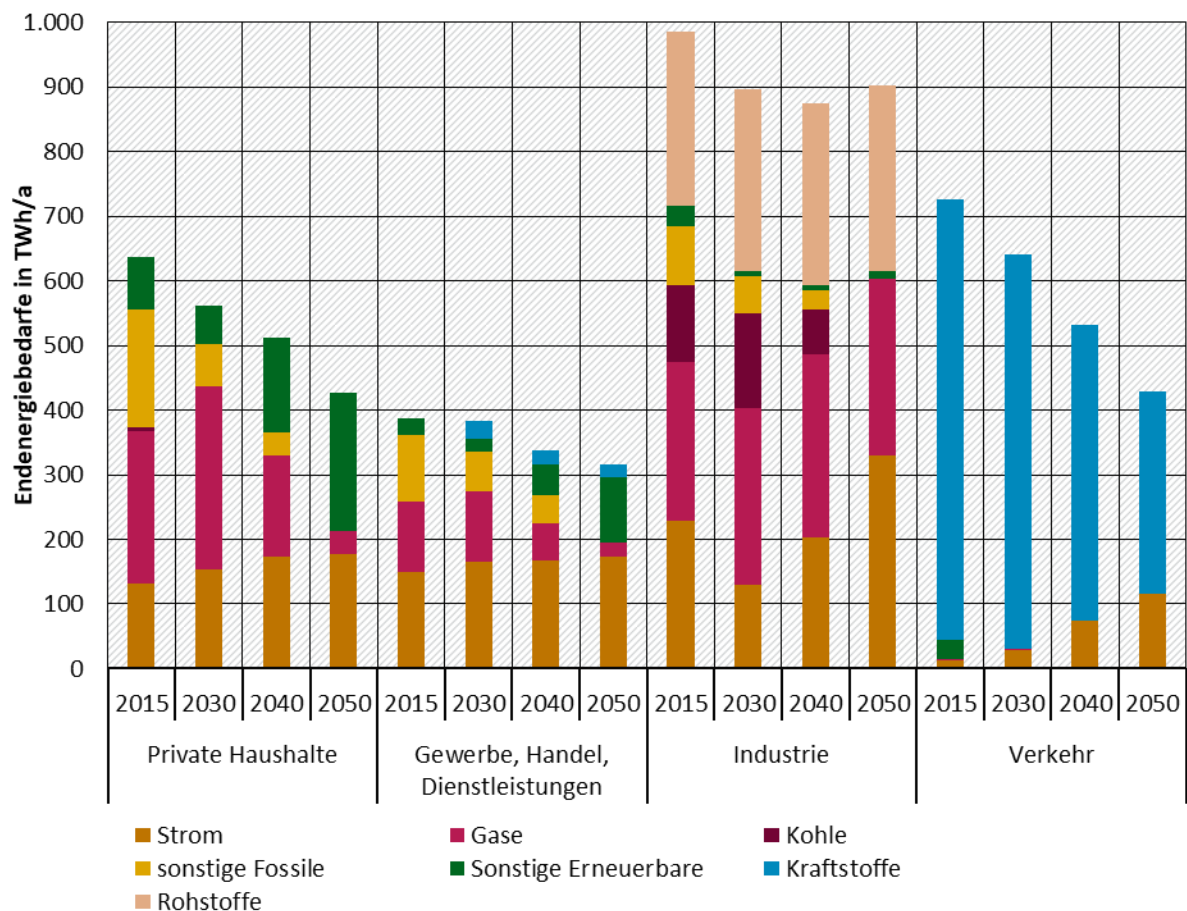
Auch die Umstrukturierung der Landwirtschaft hin zu einer emissionsarmen, modernen und nachhaltigen Landwirtschaft erfolgt verzögert. Technische Treibhausgasminderungsmaßnahmen, wie reduzierter Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement, sowie die sukzessive Renaturierung der Moore werden zu 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 Waldumbau 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.

Wesentliche Ergebnisse

Energie

Im GreenLate-Szenario sinkt der Endenergiebedarf in 2050 auf 2.071 TWh. Den größten Anteil von 902 TWh verbraucht die Industrie (43,5 %), 282 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (20,6 %), dem Verkehr (20,7 %) und GHD (15,2 %).

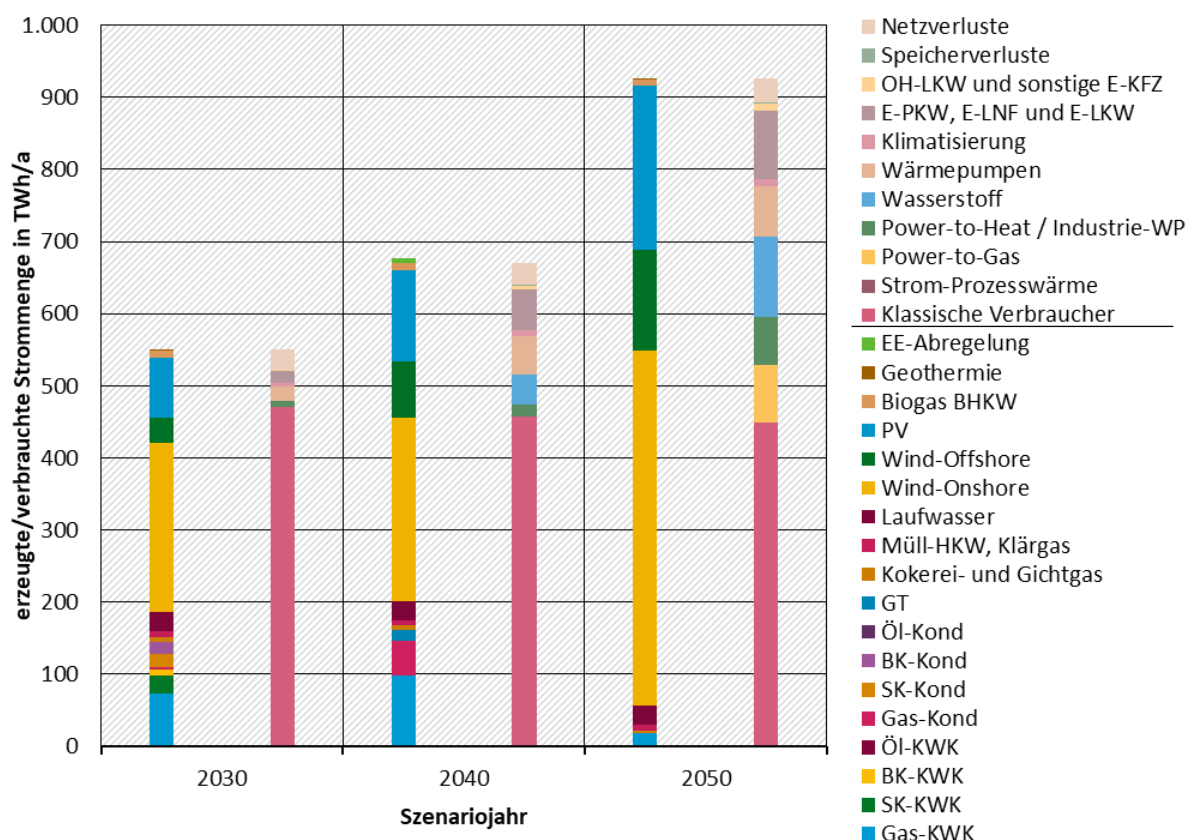
Abbildung Z-1: Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Die nationale Nettostromerzeugung steigt kontinuierlich auf insgesamt 926,5 TWh in 2050, und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien produziert. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Techniken, die im Transformationspfad kontinuierlich ausgebaut werden. In 2050 liegt die installierte Leistung bei 150,5 GW Windkraftanlagen onshore, rund 32 GW Windkraftanlagen offshore sowie rund 218 GW Photovoltaikanlagen.

Abbildung Z-2: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Aus dem Vergleich mit GreenEe1 – beschrieben in (Dittrich et al. 2020) - wird deutlich, dass es langfristig insbesondere mehr Wind onshore (+22 GW) und mehr PV (+45 GW) braucht, um die höhere nationale direkte Stromnachfrage (+ 135 TWh) decken zu können. Zusätzlich nimmt Gas aufgrund des verzögerten EE-Ausbaus eine stärkere Rolle als Brückentechnologie in der Stromerzeugung ein. Aus dem Vergleich des Stromverbrauchs wird deutlich, dass aufgrund der geringeren Effizienz z.B. bei der Raumwärmeversorgung und im Industriebereich sowie bei Antriebstechnologien bzw. ein höheres Verkehrsaufkommen eine höhere direkte Stromnachfrage resultiert.

Dagegen wird die höhere PtG/PtL-Nachfrage in GreenLate nicht durch eine höhere nationale Erzeugung gedeckt, sondern durch Importe. Sie werden in Anwendungsbereichen eingesetzt, in denen eine direkte Stromnutzung nicht möglich ist (darunter als Ausgangsrohstoff für die chemische Industrie und im Verkehrsbereich insb. im Flug- und Seeverkehr) oder insbesondere in GreenLate dort, wo durch Verzögerungen bei der Transformation und geringere Technikinnovationen noch konventionelle Techniken zum Einsatz kommen (große Teile des Straßenverkehrs oder Restbestand von Gasheizungen). Insgesamt werden etwa 823 TWh PtG/L in 2050 importiert.

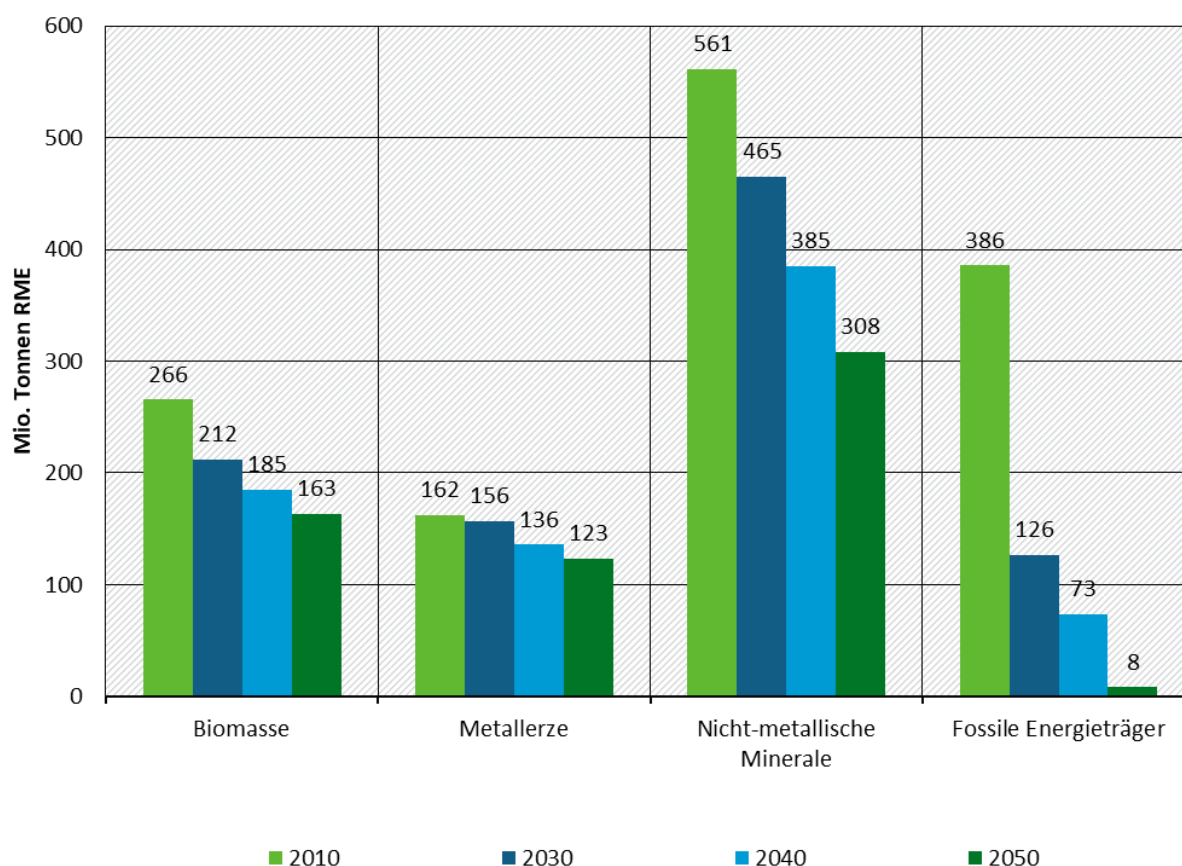
Im Verkehrssektor liegt der Endenergieverbrauch in 2050 bei insgesamt 431 TWh, 297 TWh entfallen auf den nationalen Verkehr und 134 TWh auf den internationalen Verkehr. Trotz der Rückgänge liegen die höchsten Verbräuche weiterhin im motorisierten Individualverkehr (162 TWh in 2050 ggü. 384 TWh in 2010), gefolgt vom internationalen Flugverkehr, der dagegen einen Zuwachs aufweist. Moderat rückläufig ist der Endenergieverbrauch im Straßengüterverkehr. Es zeigt sich, dass in GreenLate der nationale Verkehr bereits im Jahr 2030 20 % mehr Endenergie benötigt als GreenEe1, und bis 2050 dieser zusätzliche Endenergiebedarf auf 41 % steigt. Dabei sind die zusätzlichen Verbräuche im Jahr 2050 im Güterverkehr mit 28 % geringer als im Personenverkehr mit 63 %. Auch im internationalen

Verkehr führen die verzögerten Maßnahmen zu zusätzlichen Endenergieverbräuchen um 19 % (2030) bis 46 % (2050). Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenLate etwa 23 % mehr Kraftstoff und 29 % weniger Strom benötigt als in GreenEe1. Im Jahr 2050 werden in GreenLate nur 2 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 93 % (national) bzw. 69 % (Summe national und international) höher als in GreenEe1.

Rohstoffe

Die Transformation in GreenLate führt zu einer Reduktion des Primärrohstoffkonsums (RMC) um 56,1 % gegenüber 2010 auf insgesamt 603,3 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente. Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die um 97,8 % zurückgehen. Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (-67,3 %) aufgrund der Transformation des Energiesystems. Im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 weiterhin fossile Energieträger verwendet, dies spiegelt sich in den fossilen Rohstoffen der letzten inländischen Verwendung (RMC) wider, in der die fossilen Rohstoffe durch Importe Deutschland zugerechnet werden (Materialfußabdruck-Perspektive). Der RMC für nichtmetallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 45,0 %. Der drittstärkste Rückgang bis 2050 (-38,5 %) ist bei der Biomasse zu verzeichnen. Der geringste Rückgang ist bei den Metallerzen zu verzeichnen, welche weiterhin zentral für die Transformation bis 2050 sind. Der Rückgang des RMC verläuft nur bei den fossilen Rohstoffen sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

Abbildung Z-3: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Materialgruppen in 2010, 2030, 2040 und 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Die Gesamtrohstoffproduktivität (letzte Verwendung / Rohmaterialinput) steigt zwischen 2010 und 2030 [2030 bis 2040 / 2040 bis 2050] um 2,4 % [2,1 %/1,9 %] im Jahresdurchschnitt. In 2050 liegt sie um 235 Indexpunkte im Vergleich zum Jahr 1994 höher.

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen sinkt auf 8,4 Tonnen pro Person in 2050, dies entspricht einer Halbierung im Vergleich zu 2010 (-50,1 %).

Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte sinkt auf 229,8 Mio. Tonnen RME in 2050. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist in 2050 das rohstoffintensivste mit 103,4 Mio. Tonnen RME, gefolgt vom Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt (45,7 Mio. t RME) und Freizeit und Tourismus (41,9 Mio. t RME).

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen auf insgesamt 40,8 Mrd. Tonnen RME. Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (46,5 %), gefolgt von biotischen Materialien (22,8 %) und fossilen Rohstoffen (17,6 %).

Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 218 Mio. Tonnen Primärrohstoffe in 2050 eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 27 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe1 führt die langsame Transformation in GreenLate zu einem höheren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 11,6 % höher als in GreenEe1. Der Unterschied ist in 2050 bei den Metallerzen besonders ausgeprägt. In Folge des höheren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person mit 8,4 Tonnen in 2050 um 11,6 % höher als in GreenEe1. Dies ist eine Reduktion um 50,1 % gegenüber 2010. Der Konsum von Lebensmitteln stellt dabei den größten Anteil des Konsums der privaten Haushalte in 2050, während die Rohstoffaufwendungen für Mobilität, Wohnen und Freizeit signifikant sinken. Trotz Reduktion der absoluten Rohstoffmengen bleiben die Rohstoffaufwendungen für die Unterhaltung und Erneuerung der bestehenden Gebäude- und Infrastrukturen weiterhin vergleichsweise hoch.

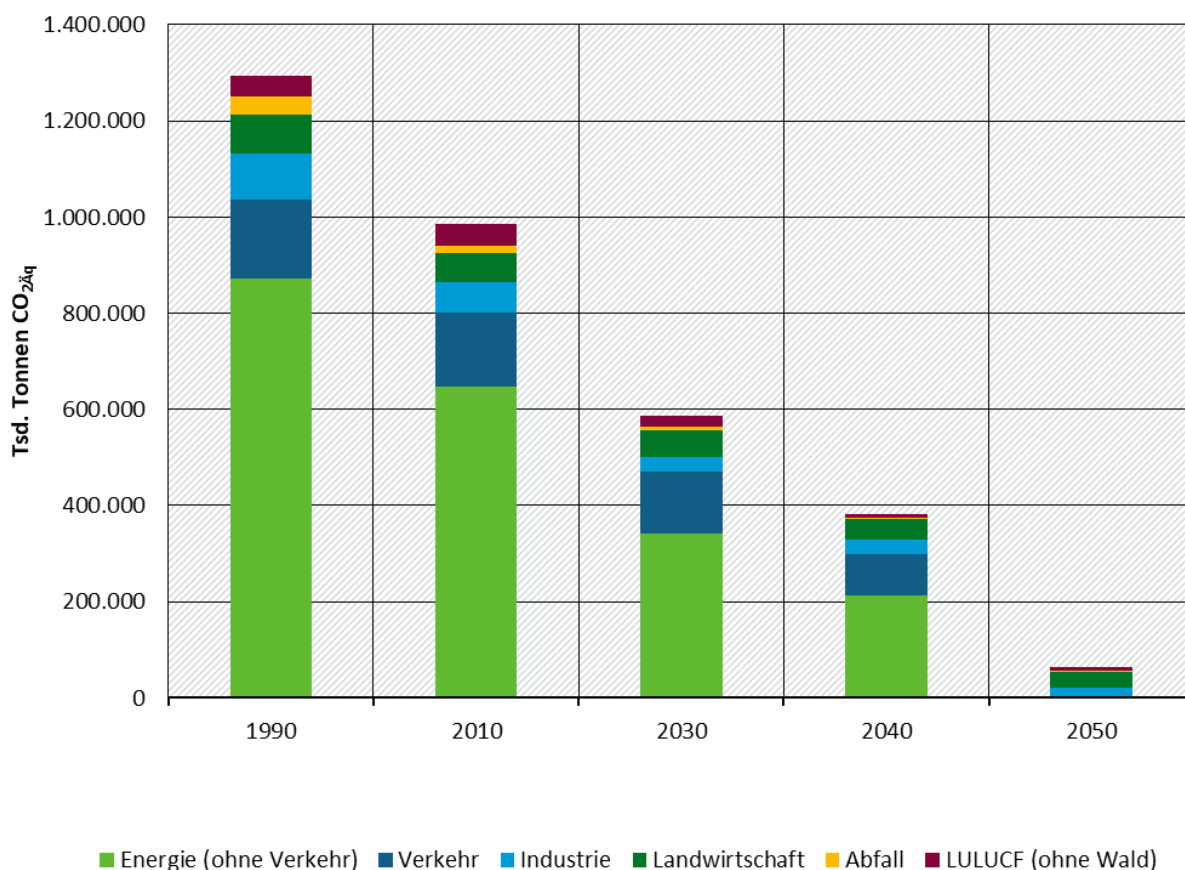
In GreenLate werden eine Vielzahl von Metallen sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer höheren Menge als in GreenEe1 nachgefragt. Die Nachfrage nach der Mehrzahl der untersuchten Rohstoffe ist rückläufig. Ausnahmen sind Rohstoffe, die im Zuge der Transformation für Schlüsseltechnologien erforderlich sind. Die Nachfrage steigt im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien später an. So ist in 2030 aufgrund der späten Umstellung die (anteilig-deutsche) Nachfrage nach Lithium noch gering. Dies ist in den GreenEe-Szenarien anders, hier ist die von Deutschland nachgefragte Menge bereits in 2030 überproportional hoch. Verglichen mit den heutigen Produktionsmengen liegt die deutsche Nachfrage in 2050 nach Kupfer, Zink, Blei, Zinn, PGM, Nickel, Magnesium und Lithium überproportional hoch, gemessen am Anteil der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung.

Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen in GreenLate, einschließlich LULUCF (ohne Wald), betragen 63,50 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 und gehen damit um 95,1 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück. Unter Einbeziehung der natürlichen Senken (Wald) kann GreenLate der Treibhausgasneutralität in 2050 nahekomen. Bis 2030 [2040] sinken die THG-Emissionen um 54,8 % [70,5 %]. Die höchsten Rückgänge (nach NIR) bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (-84,0 %) (Tabelle 44). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 30,4 % gegenüber 1990 zurückgehen. In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, treibhausgasneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 92,2 %, 85,6 % und 77,8 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 59,1 %. Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs zu nennen. Im Verkehr setzen sich die THG-Emissionen aus der internationalen Seeschifffahrt und des Flugverkehrs zusammen. Bis 2030 steigen diese auf insgesamt 37,2 Mio. t CO_{2Äq}. In 2040 wird der internationale Verkehr fast ausschließlich mit

synthetischen Kraftstoffen versorgt und verursacht nur noch 5,5 Mio. t CO₂Äq. In 2050 ist er dann bilanziell neutral.

Abbildung Z-4: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050



Quellen: (UBA 2019b) 1990-2016, eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG 2017-2050

Die prozessbedingten THG-Emissionen aus der Industrie einschließlich sonstiger THG-Emissionen wie F-Gase betragen im Jahr 2050 insgesamt 21,4 Mio. t CO₂Äq. Dabei sind in allen Industriezweigen Rückgänge bereits über den Pfad zu verzeichnen. In 2050 dominieren die prozessbedingten THG-Emissionen der Zementindustrie mit 75,5 %, gefolgt von der Kalk- und Glasindustrie (18,2 % bzw. 2,9 %) die prozessbedingten THG-Emissionen. Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr. Zusätzlich entstehen fluorierter Treibhausgase. Sie gehen bis 2050 auf insgesamt 1,3 Mio. t CO₂Äq zurück. Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,76 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO₂Äq.

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 59,1 % in 2050 gegenüber 1990. Der größte absolute Rückgang geht dabei auf die Tierhaltung zurück (-21,5 Mio. t CO₂Äq), der größte prozentuale Rückgang verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (-88 %). Die THG-Emissionen im Abfallsektor gehen auf 2,96 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Tabelle 49 und Tabelle 51 zeigen die weitere Aufschlüsselung nach Untergruppen im Zeitverlauf. Etwa die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen. Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Die verbleibenden THG-Emissionen werden auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen verursacht.

Die THG-Emissionen, die Deutschland zwischen 1990 und 2016 (nach NIR) emittiert hat, summieren sich auf insgesamt 28,96 Mrd. t CO₂Äq. Bis 2050 kommen im Szenario GreenLate

weitere 17,39 Mrd. t CO₂Äq hinzu. Der Großteil von 10,58 Mrd. t entsteht im Zeitraum bis 2030. 62,4 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt (ohne Verkehr), 17,3 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,2 % und auf die Landwirtschaft 7,5 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050. Zwischen 2010 und 2050 werden nach Abschätzung auf Basis des WEHAM Naturschutzpräferenzszenarios (Rüter et al. 2017) insgesamt mindestens 0,99 Mrd. t CO₂ im Wald gebunden. Dies entspricht einem Anteil von 4,7 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 2010 und 2050.

Auch die THG-Emissionen, die der deutsche Konsum im In- und Ausland verursacht, ist rückläufig. Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit in 2050 [2030/2040] nur noch 62,0 [565,0/363,7] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von 93,6 % gegenüber 2010 entspricht (gerechnet nach dem UGR-Konzept). In den Stützjahren dominieren die energiebedingten THG-Emissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen.

Im GreenLate-Szenario entstehen somit mehr THG-Emissionen als im GreenEe1-Szenario. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 17,6 % [13,5 %/48,9 %] mehr Treibhausgase nach NIR (ohne Wald) emittiert als in GreenEe1. Ein wichtiger Unterschied liegt in der geringeren Reduktion der Industrie, sowie der Landwirtschaft. Im Pfad verursachen zudem die späte Transformation im Energie- und Transportsektor zusätzliche THG-Emissionen. Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenLate um 2,145 Mrd. t CO₂Äq (4,9 %) höher als in GreenEe1.

Das GreenLate-Szenario zeigt, dass weniger ambitionierte und späte Umstellungen zu erhöhten Treibhausgasemissionen und Primärrohstoffnachfrage führen als eine ambitioniertere Umstellung.

Summary

Background and objectives

Climate change is a key challenge of today. The international community, including Germany, is committed to limiting the temperature rise to below 2 degrees. This means that Germany must significantly reduce greenhouse gas emissions and achieve practically greenhouse gas neutrality. Greenhouse gas neutrality is defined in the RESCUE project as a reduction of greenhouse gas emissions by (at least) 95 % in 2050 compared to 1990. A reduction to such an extent is only possible if GHG emissions are reduced in all sectors. Energy supply affecting all areas of the economy needs to be fundamentally transformed. In addition, natural resources must be used much more sparingly than today in all areas of the economy. This is where the RESCUE (Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality) project comes in. RESCUE examines the following questions:

1. What options exist to achieve at least a 95 % reduction in greenhouse gas emissions in 2050?
2. How can the transformation towards GHG-neutrality be designed?
3. Which raw material consumption is associated with the transformation pathways?

To answer the questions, a total of six scenarios were developed in close cooperation between the German Environment Agency and the authors of this study. The scenarios imply different levels of ambition and rates of change. The following table shows the 'Green' scenarios and their respective ambition levels in comparison. The German Environment Agency has also written publications based on the work of this project, see www.uba.de/rescue-projekt. This report documents the scenario „Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Late transition”, in short GreenLate.

Table Z- 1: Comparing the level of ambition of the Green-scenarios

	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
Energy efficiency	Very high	Very high	Medium	Very high	Very high	Very high
Material efficiency	High	High	Medium	Very high	High	Very high
Technological innovation	High	High	Low	Very high	High	Very high
Sustainable action	Medium	Medium	Low	Medium	Very high	Very high
Liberation from economic growth	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium	Very high
Alignment of global technical development	Low	Low	Low	High	Low	High
Reduction of new soil sealing	High	High	High	High	Very high	Very high
Climate protection efforts before 2050	High	High	Low	High	High	Very high

Source: own illustration based on UBA (2019a)

Narrative of the GreenLate scenario

The orientation of the GreenLate scenario is defined very precisely in (UBA 2019a): GreenLate ("Germany - resource efficient and greenhouse gas neutral - Late transition"), outlines a possible transformation path for Germany as an export-oriented industrial location with a modern, efficient society. Through the delayed increase in the level of ambition in the implementation of climate protection measures in the scenario, GreenLate illustrates the challenges of delayed action in achieving a GHG reduction of 95 % by 2050.

The common understanding and the will to implement climate protection, decarbonisation and more resource protection must initially be promoted even more strongly. The measures and investments required to achieve a GHG reduction of around 95 % compared to 1990 must therefore be implemented for the most part in a shorter period of time and later. This requires, especially at the end of the first half of the century, enormous structural changes combined with a very high willingness to invest in everyday social and industrial life. The level of ambition to exploit energy and material efficiency potentials is generally lower. The trend to effectively implement the required high level of ambition in climate and resource protection at a later date is also taking place at international level.

The energy supply in 2050 will be based entirely on renewable energies. Less social understanding of how to exploit material and energy efficiency potentials will lead to a high energy demand. Delayed action means that the development and introduction of GHG-extensive technologies in the application areas will be overslept. Only in application areas with short renewal cycles and areas with high investment incentives can high penetration rates of direct current-based and thus systemically efficient technologies be achieved by 2050. In many areas, conventional energy technologies are still in use to a large extent, so that the demand for imported, renewably generated electricity-based energy sources is significantly increased. The integration of renewable energies is making progress in the electricity supply.

In industry, it is mainly efficiency potentials that will be tapped by 2030. The restructuring and renewal of the plant and equipment fleet will take place particularly at the end of the first half of the century. Although all process technologies will be converted to greenhouse gas-neutral energy sources by 2050, research and development of GHG-extensive technologies will not be initiated at an early stage, so that the restructuring towards modern, efficient, decarbonised process technologies will not be completed by 2050. Instead, existing technologies will be used, so that there will be an increased demand for renewable, electricity-based energy sources to supply industrial needs. Only industries with short renewal cycles can still switch to directly electricity-based and thus systemically efficient final energy sources. There is a common understanding that CCS technologies do not represent a sustainable and permanent option for reducing process-related GHG emissions, so that investments are not sunk in the development of this bridge technology, but are used in a targeted manner. Sectors of industry where no alternatives exist for the necessary process-related GHG reductions, for example in the steel industry, recognise these requirements and act accordingly so that the technology change is realised. The lower level of social understanding for the exploitation of material and energy efficiency potentials also leads to a reduced pressure to innovate in production. Compared to the GreenEe scenarios, this means that raw material efficiency and recycling potentials are only partially exploited. Overall, this results in an annual average increase in raw material productivity up to 2050, which is below the trend of the last decade. Even internationally, raw material efficiency and material substitution are only implemented with a delay, so that the state of technological development in 2050 will still be comparable within Europe. Internationally, however, the gap is narrowing considerably, so that the global state of technological development in 2050 will be roughly the same as in Germany in 2040.

The delayed common understanding and the will to implement climate and resource protection lead to a noticeably lower number of modernised and refurbished buildings compared to the

GreenEe scenarios. Here too, conventional decentralised heating technologies, which essentially shape the picture today, are still in use. The proportion of construction methods and building materials used is comparable to today's. The lower level of understanding for climate and resource protection is also evident in terms of heated living space. This is higher compared to the GreenEe scenarios despite identical, declining population growth.

The acceptance and increased implementation of traffic avoidance and modal shift beyond today's trend will only occur at the end of the first half of the century. Similarly, the integration of electromobility in private and public transport is delayed, even though electromobility will dominate the vehicle population by 2050. The restructuring of heavy road traffic by 2050 will not be completed because there will be a delay in infrastructure expansion and in research and development for electrification. Accordingly, in 2050 heavy goods traffic will be dominated by internal combustion engines. The combination of adherence to conventional technologies, less progress in more efficient drive technologies and less modal shift and modal shift will lead to high renewable fuel requirements.

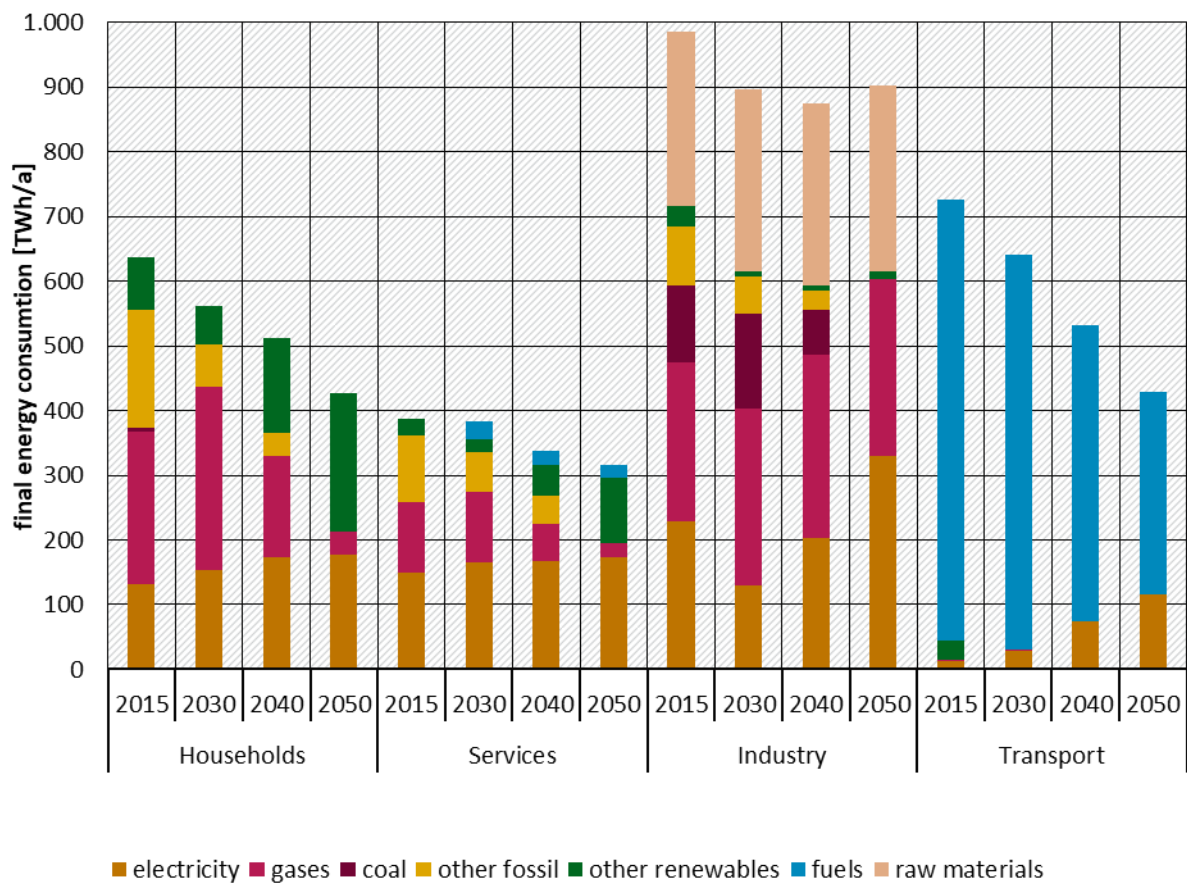
The restructuring of agriculture towards low-emission, modern and sustainable agriculture is also delayed. Technical greenhouse gas reduction measures, such as reduced use of mineral fertilizers and manure management, as well as the successive renaturation of the moors are only being implemented slowly at the beginning and then, for the most part, more quickly. Demand for sustainable regional agricultural products is significantly below the level of the other scenarios throughout the transformation path. The trend towards healthier eating habits only picks up speed in the population from the middle of the first half of the century onwards, leading to re-reduced livestock numbers which are nevertheless higher than in the GreenEe scenarios. The forest restructuring already initiated today and the associated changes in forest management continue to allow for a net carbon sink and increased biodiversity protection. As in the GreenEe scenarios, public forest owners are increasingly leading the way and providing impetus.

Main results

Power

In the GreenLate scenario, the final energy demand falls to 2,071 TWh in 2050. The largest share of 902 TWh is consumed by industry (43.5 %), 282 TWh of which is for raw material use in the chemical industry, followed by private households (20.6 %), transport (20.7 %) and GHD (15.2 %).

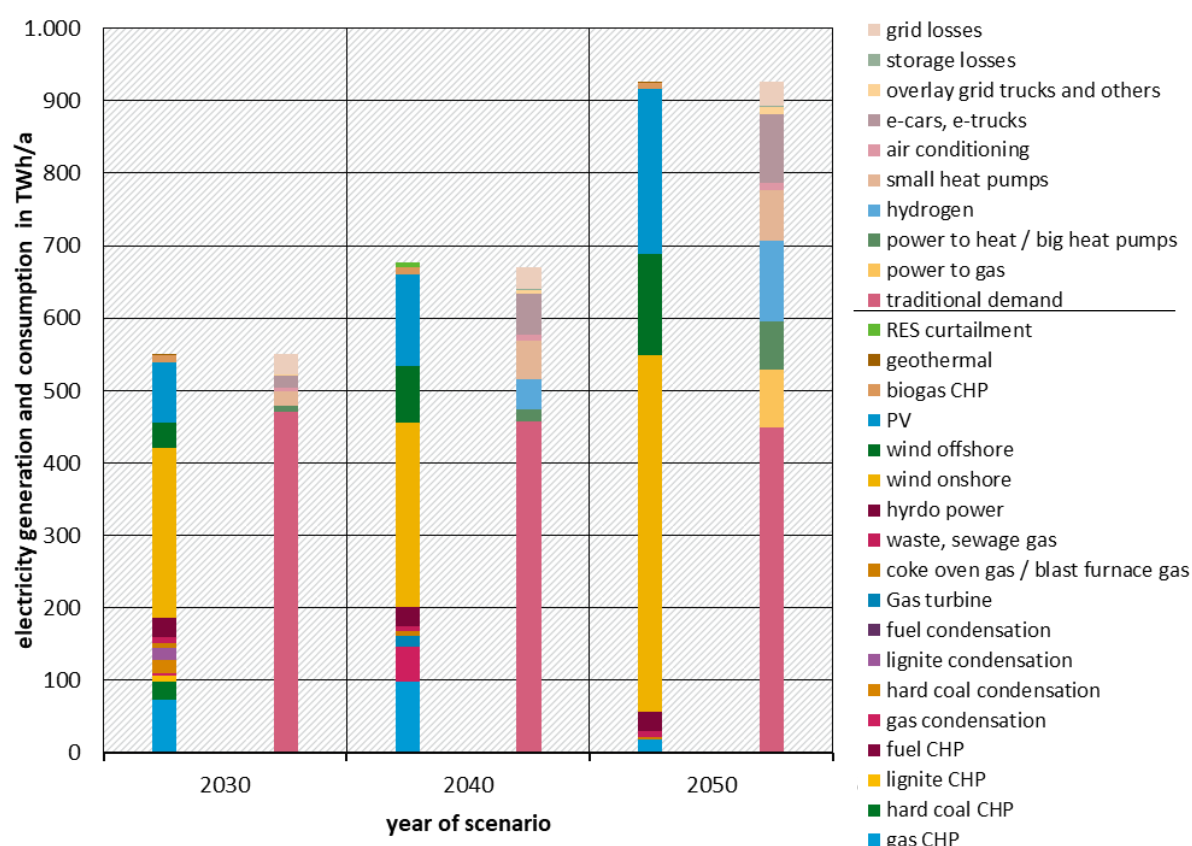
Figure Z-5: Development of final energy demand in GreenLate



Quelle: own modelling results ifeu/IEE/SSG - SCOPE

The national net electricity generation is continuously increasing to a total of 926.5 TWh in 2050, and will be exclusively produced with renewable energies in that year. Wind power plants on- and offshore as well as photovoltaics are the dominant technologies, which will be continuously expanded on the transformation path. In 2050, the installed capacity will be 150.5 GW of wind turbines onshore, around 32 GW of wind turbines offshore and around 218 GW of photovoltaic systems.

Figure Z-6: Net electricity generation and consumption in Germany, GreenLate



Quelle: own modelling results ifeu/IEE/SSG - SCOPE

The comparison with GreenEe1 - described in (Dittrich et al. 2020)- shows that in the long term more wind onshore (+22 GW) and more PV (+45 GW) will be needed to meet the higher national direct electricity demand (+135 TWh). In addition, gas is taking on a stronger role as a bridging technology in power generation due to the delay in the expansion of renewables. A comparison of electricity consumption shows that higher direct demand for electricity results from lower efficiency, e.g. in space heating and in the industrial sector, as well as in drive technologies and higher traffic volumes.

In contrast, the higher demand for PtG/PtL in GreenLate is not covered by higher national production, but by imports. They are used in areas of application where direct use of electricity is not possible (including as a raw material for the chemical industry and in the transport sector, especially in air and sea transport) or, in particular, in GreenLate where conventional technologies are still being used due to delays in transformation and fewer technological innovations (large parts of road traffic or remnants of gas heating systems). In total, about 823 TWh PtG/L will be imported in 2050.

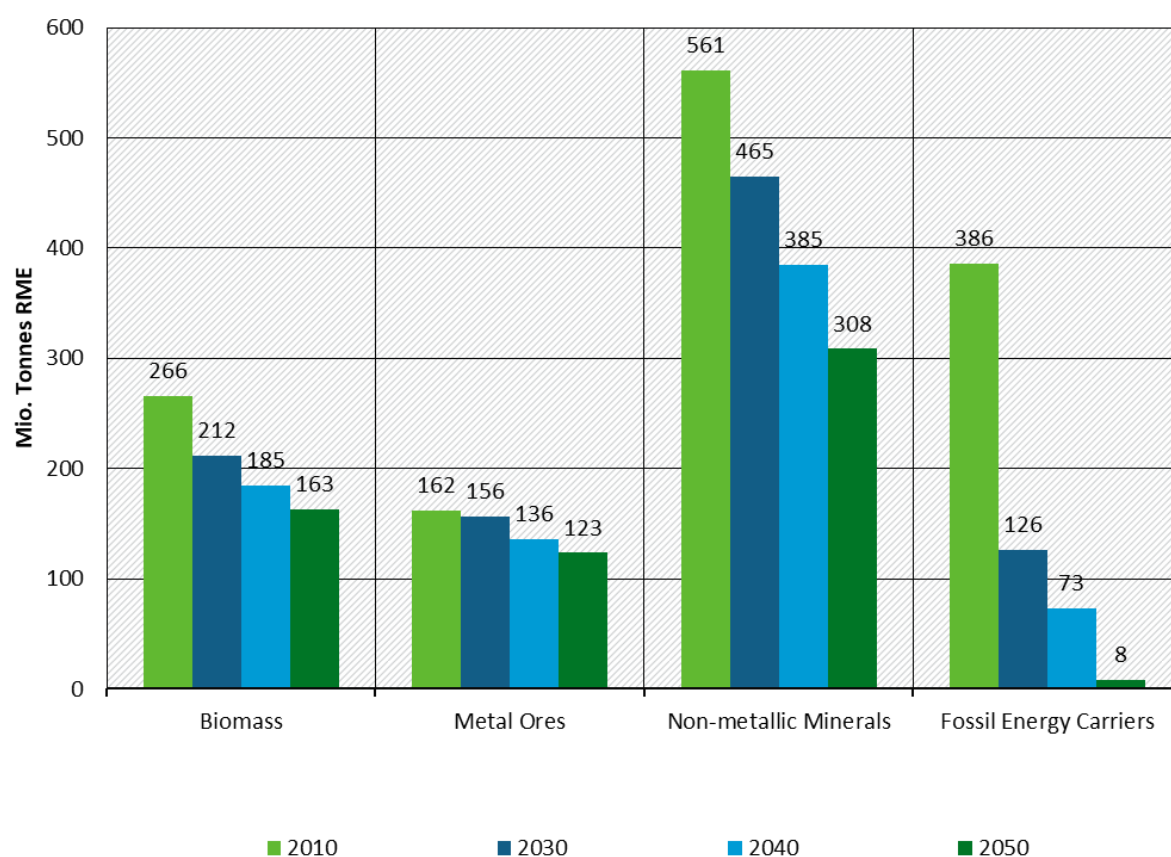
In the transport sector, total final energy consumption in 2050 will be 431 TWh, 297 TWh for national transport and 134 TWh for international transport. Despite the declines, the highest consumption is still in private motorised transport (162 TWh in 2050 vs. 384 TWh in 2010), followed by international air transport, which is growing. Final energy consumption in road freight transport has declined moderately. It can be seen that in GreenLate, national transport already requires 20 % more final energy in 2030 than GreenEe1, and that this additional final energy requirement will rise to 41 % by 2050. At 28 %, the additional consumption in 2050 in freight transport is lower than in passenger transport (63 %). In international transport, too, the delayed measures will lead to additional final energy consumption of 19 % (2030) to 46 % (2050). In total, GreenLate will need about 23 % more fuel and 29 % less electricity in 2030 than

GreenEe1. In 2050, GreenLate will use only 2 % less electricity, but fuel consumption will be 93 % (national) and 69 % (total national and international) higher than in GreenEe1.

Raw material use

The transformation to GreenLate leads to a reduction in raw material consumption (RMC) by 56.1 % compared to 2010 to a total of 603.3 million tonnes of raw material equivalents. The sharpest decline is in fossil fuels, which are down 97.8 %. The decline is particularly high between 2010 and 2030 (-67.3 %) due to the transformation of the energy system. According to the assumption that fossil fuels will continue to be used abroad in 2050, this is reflected in the fossil fuels of the last domestic use (RMC), in which the fossil fuels are attributed to Germany through imports (material footprint perspective). The RMC for non-metallic minerals decreases by 45.0 % between 2010 and 2050. The third largest decrease until 2050 (-38.5 %) is for biomass. The smallest decrease is observed for metal ores, which remain central to the transformation until 2050. The decline of the RMC is only abrupt for fossil fuels, but steady for all other raw material groups.

Figure Z- 7 Primary raw material consumption (RMC) by raw material, 2010 to 2050



Quelle: Own modeling results ifeu/IEE/SSG - URMOD

Total raw material productivity (last use/raw material input) will increase by 2.4 % [2.1 %/1.9 %] on annual average between 2010 and 2030 [2030 to 2040 / 2040 to 2050]. In 2050 it is 235 index points higher than in 1994.

The per capita consumption of primary raw materials falls to 8.4 tonnes per person in 2050, which is half that of 2010 (-50.1 %).

The consumption of primary raw materials by private households will decrease to 229.8 million tons of RME in 2050. The need for food will be the most raw material-intensive in 2050 with

103.4 million tons of RME, followed by the need for housing and households (45.7 million tons of RME) and leisure and tourism (41.9 million tons of RME).

Between 2010 and 2050, the consumption of primary raw materials will cumulate to a total of 40.8 billion tonnes of RME. Non-metallic minerals (46.5 %) account for the largest share, followed by biotic materials (22.8 %) and fossil raw materials (17.6 %).

Material recycling can save a total of (at least) 218 million tonnes of primary raw materials in 2050, which corresponds to a share of 27 % of total raw material consumption (primary and secondary).

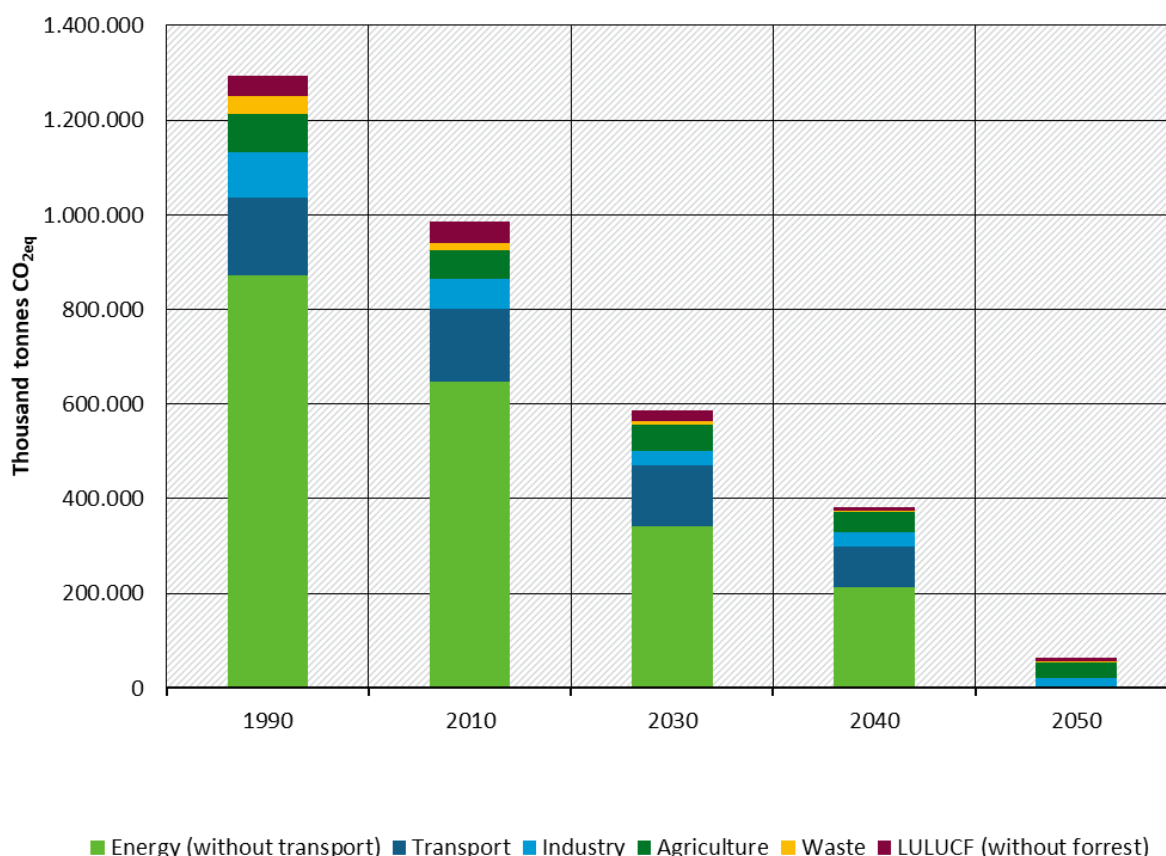
Compared to the transformation in GreenEe1, the slow transformation in GreenLate leads to a higher consumption of raw materials. In 2050 the RMC is 11.6 % higher in total than in GreenEe1. The difference is particularly pronounced in 2050 for metal ores. As a result of the higher RMC, the raw material consumption per person will be 8.4 tonnes in 2050, 11.6 % higher than in GreenEe1. This is a reduction of 50.1 % compared to 2010, with food consumption accounting for the largest share of private household consumption in 2050, while raw material expenditure on mobility, housing and leisure will fall significantly. Despite a reduction in the absolute quantities of raw materials, the raw material costs for the maintenance and renewal of existing buildings and infrastructures will remain comparatively high.

In GreenLate, a large number of metals are in demand, both in path and cumulated up to 2050, in higher quantities than in GreenEe1. The demand for the majority of the raw materials studied is declining, with the exception of raw materials required for key technologies in the course of transformation. Compared to the other Green scenarios, demand increases later. For example, in 2030 the (proportionate German) demand for lithium is still low due to the late transition. This is different in GreenEe1, where the quantity demanded by Germany is already disproportionately high in 2030. Compared to today's production volumes, the German demand for copper, zinc, lead, tin, PGM, nickel, magnesium and lithium in 2050 will be disproportionately high, measured by the share of the German population in the world population.

GHG emissions

Greenhouse gas emissions in GreenLate, including LULUCF (without forestry), amount to 63.50 million t CO_{2eq} in 2050, a decrease of 95.1 % compared to 1990 (UBA 2019a). By 2030 [2040] GHG emissions will decrease by 54.8 % [70.5 %]. The largest reductions (by NIR) up to 2030 are recorded in waste management (-84.0 %) (Tabelle 44). This contrasts with agriculture, whose GHG emissions by 2030 are only 30.4 % lower than in 1990. In 2050, the energy sector, including transport, is GHG neutral and the GHG emission reductions compared to 1990 are accordingly 100 %. GHG emissions from waste management, LULUCF (without forestry) and industry also decrease significantly by 2050, with reductions of 92.2 %, 85.6 % and 77.8 % respectively. The smallest decreases are in the agriculture sector with only 59.1 %. GHG emissions from international transport are also noteworthy. In transport, GHG emissions from international shipping and aviation are combined. By 2030 these will increase to a total of 37.2 million tonnes of CO_{2eq}. In 2040, international transport will be almost exclusively powered by synthetic fuels and will only generate 5.5 million tonnes of CO_{2eq}. In 2050 it will be neutral in terms of the balance sheet.

Figure Z- 8: Greenhouse gas emissions by sources, 1990 to 2050



Quellen: Own illustration based on (UBA 2019b)1990-2016, own calculations ifeu/IEE/SSG 2017-2050

Process-related GHG emissions from industry, including other GHG emissions such as F-gases, will total 21.4 Mt CO_{2eq} in 2050, with reductions in all industrial sectors already above path. In 2050, process-related GHG emissions from the cement industry will dominate with 75.5 %, followed by the lime and glass industry (18.2 % and 2.9 % respectively). The metal industry (excluding iron) as well as the foundry, textile, food and paper industries will no longer emit GHG emissions in 2050. Fluorinated greenhouse gases will also be emitted. These will decrease to a total of 1.3 million tonnes of CO_{2eq} by 2050. GHG emissions from solvents and other product applications will decrease to a total of 0.76 million tonnes CO_{2eq} in 2050. Furthermore, nitrous oxide causes GHG emissions of 0.013 million tonnes CO_{2eq}.

Overall, GHG emissions from agriculture will decrease by 59.1 % in 2050 compared to 1990, with the largest absolute decrease in emissions from livestock (-21.5 Mt CO_{2eq}) and the largest percentage decrease in emissions from changes in manure management (-88 %). GHG emissions in the waste sector will fall to 2.96 million tonnes CO_{2eq} in 2050. Tabelle 49 and Tabelle 51 show the further breakdown by subgroup over time. About half of the GHG emissions in 2050 will come from wastewater treatment plants. The GHG emissions of the source group LULUCF (without forestry) will decrease to a total of 6.5 million tonnes CO_{2eq} in 2050. The remaining GHG emissions are caused by arable and grassland land and settlement areas.

The GHG emissions that Germany emitted between 1990 and 2016 (according to NIR) add up to a total of 28.96 billion t CO_{2eq}. In the GreenLate scenario, a further 17.39 billion t CO_{2eq} are added by 2050. The majority of 10.58 billion t is generated in the period up to 2030. 62.4 % of the cumulative GHG emissions between 1990 and 2050 are energy-related (excluding transport), 17.3 % are from transport. Industry accounts for 7.2 % and agriculture for 7.5 % of cumulative GHG emissions by 2050. Between 2010 and 2050, according to estimates based on the WEHAM nature conservation preference scenario (Rüter et al. 2017). At least 0.99 billion t CO₂ will be

sequestered in forests. This corresponds to a share of 4.7 % of cumulative GHG emissions between 2010 and 2050.

GHG emissions caused by German consumption at home and abroad are also declining. In 2050 [2030/2040], private and public consumption as well as investments (last domestic use of Germany) will cause only 62.0 [565.0/ 363.7] million t CO₂eq worldwide, which corresponds to a decrease of -93.6 % compared to 2010 (calculated according to the UGR concept). In the support years, energy-related GHG emissions dominate the goods of last use. Only in 2050 will non-energy-related GHG emissions be higher than energy-related GHG emissions.

Thus, the GreenLate scenario produces more GHG emissions than the GreenEe1 scenario. In 2050 [2030/2040] a total of 17.6 % [13.5 %/48.9 %] more greenhouse gases are emitted in NIR (excluding forests) than in GreenEe1. An important difference is the smaller reduction of industry and agriculture. In the path, the late transformation in the energy and transport sector also causes additional GHG emissions. The cumulative greenhouse gases between 1990 and 2050 are consequently 2.145 billion tonnes CO₂eq (4.9 %) higher in GreenLate than in GreenEe1.

The GreenLate scenario shows that less ambitious and late conversions lead to increased greenhouse gas emissions and primary resource demand than more ambitious conversions.

1 Einleitung

1.1 Herausforderung Klimawandel und die GreenSzenarien

Der Klimawandel ist eine zentrale Herausforderung der Gegenwart. Die durchschnittliche globale Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre lag 2018 bereits bei 407 ppm (UBA 2019c). Zum Vergleich: die vorindustrielle Kohlendioxidkonzentration lag bei 280 ppm. Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits in der Gegenwart spürbar. Je höher die Konzentration von Kohlendioxid und weiterer Treibhausgase ansteigt, desto stärker wird sich das weltweite Klima und in Folge die Lebensbedingungen in nahezu allen Ökosystemen auf der Erde ändern.

Die Staatengemeinschaft, darunter Deutschland, bekennt sich mit dem Übereinkommen von Paris dazu, den Temperaturanstieg auf unter 2 Grad zu begrenzen. Dieser Anstieg bedeutet bereits, dass manche Ökosysteme wie Korallenriffe kaum noch eine Überlebenschance haben, Wetterextreme zunehmen und sich das Leben der Menschen weltweit anpassen muss. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, dass andere Ökosysteme wie tropische Regenwälder oder boreale Wälder überleben können und Kipppunkte, die zu sich selbst verstärkenden Prozessen der Klimaerwärmung führen, nicht überschritten werden. Mit einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf unter 2 Grad hofft man ebenso, dass die Anpassungsfähigkeit der Menschheit an die Veränderungen nicht überstrapaziert wird (UNFCCC 2015).

Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 Grad beinhaltet, dass Deutschland den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant reduzieren und eine weitestgehende Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitestgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden (ohne zusätzliche THG-Emissionen durch LULUCF ohne Wald oder mögliche negative THG-Emissionen durch Wald (Extensivierung und Holznutzung)).

In den ersten 30 Jahren bis Ende 2019 konnten die Treibhausgasemissionen um 35,7 % gegenüber 1990 gesenkt werden, dies entspricht einer Emissionsreduktion von 447 Millionen Tonnen CO₂Äq in 2019 im Vergleich zu 1990 (UBA 2020). Wichtige Beiträge waren die Schließung von Kohlekraftwerken in der ehemaligen DDR und der Rückgang der Kohlenutzung im Zuge der Energiewende. In den anstehenden 31 Jahren müssen weitere 742 Millionen Tonnen Treibhausgase reduziert werden, um die hier definierte Treibhausgasneutralität zu erreichen.

Eine Reduktion in diesem Ausmaß ist nur möglich, wenn die THG-Emissionen in allen Bereichen verringert werden und die Energieversorgung, die Einfluss auf alle Bereiche der Wirtschaft hat, grundlegend verändert wird. Dies allein reicht jedoch nicht. Darüber hinaus müssen auch alle natürlichen Ressourcen viel sparsamer als heute in allen Bereichen der Wirtschaft eingesetzt werden. Warum ist das so wichtig? Das gegenwärtige Energiesystem basiert auf der Verbrennung von fossilen Rohstoffen und ist für den Großteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die erforderliche vollständige Umstellung auf erneuerbare Energiequellen erfordert nicht nur neue Technologien, sondern auch ihre vollständige Implementierung – in Deutschland und in anderen Ländern der Erde. Auch wenn keine fossilen Rohstoffe mehr gebraucht werden, so steigt dennoch die Nachfrage nach anderen, ebenso begrenzt vorkommenden Rohstoffen, um die neuen Techniken zu errichten. Je geringer die (zusätzliche) Gesamtnachfrage ausfällt, desto weniger Gründe für sektorale oder regionale Verteilungskonflikte und desto weniger (zusätzliche) Umweltbelastungen entstehen in Folge. Wie genau die Spielräume in Deutschland für eine Transformation zur Treibhausgasneutralität oder weitestgehenden Treibhausgasneutralität sind und welche Rohstoffe in welchem Ausmaß nachgefragt werden, das wurde im Projekt RESCUE untersucht.

Das Projekt RESCUE baut auf der Studie Treibhausgasneutrales Deutschland (UBA 2014) auf. Treibhausgasneutrales Deutschland beschreibt erstmalig, wie Deutschland in 2050 eine

Treibhausgasminderung um mindestens 95 % gegenüber 1990 erreichen kann. RESCUE geht nun verschiedene Schritte weiter und untersucht:

1. Welche weiteren Optionen bestehen, um in 2050 eine 95 %ige Minderung von Treibhausgasemissionen zu erreichen?
2. Wie kann bzw. muss der Weg dorthin gestaltet werden?
3. Welcher Rohstoffkonsum ist mit den Transformationswegen verbunden?

Zur Beantwortung der Fragen wurden insgesamt sechs Szenarien entworfen, die unterschiedliche Ambitionsniveaus und Veränderungsgeschwindigkeiten beinhalten. Die folgende Tabelle 1 zeigt die Green-Szenarien und ihre jeweiligen Ambitionsniveaus im Vergleich. Dieser Bericht dokumentiert das Szenario GreenLate.

Tabelle 1: Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich

	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green-supreme
Energieeffizienz	Sehr hoch		Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Materialeffizienz	Hoch		Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Technikinnovation	Hoch		Gering	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Nachhaltiges Handeln	Mittel		Sehr gering	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Wachstumsbefreiung	Mittel		Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Ausgleich des globalen Technologieniveaus	Niedrig		Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Verringerung der Flächenneuersiegelung	Hoch		Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Klimaschutzbestrebungen im Pfad Handelsbilanz und Wirtschaftswachstum	Hoch		Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch
	Anstieg Exportüberschuss	Eher ausgeglichener Handel	Anstieg Exportüberschuss	Eher ausgeglichener Handel	Eher ausgeglichener Handel	Eher ausgeglichener Handel + Wachstumsbefreiung

Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von UBA (2019a)

Aufgrund der vorgegebenen Produktionszahlen ist GreenLate mit GreenEe1 zu vergleichen.

1.2 GreenLate: Leitlinien und Ausrichtung

Das GreenLate-Szenario beschreibt einen Transformationspfad im Lösungsraum hin zu einem weitestgehenden treibhausgasneutralen Deutschland in 2050. GreenLate steht für „Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – late transition“. Im Gegensatz zu allen anderen Green-Szenarien beginnen in GreenLate in allen Sektoren die Umstellungen so spät wie möglich und sind weniger ambitioniert. Gleichzeitig muss um diese Verzögerung wieder aufzuholen, dann in kürzer Zeit mehr Infrastruktur aufgebaut werden. Nicht erfolgte Umstellungen müssen über Importe von synthetischen Energieträgern (Kraft- und Brennstoffe) ausgeglichen werden. GreenLate stellt so ein Szenario der geringen „Elektrifizierung“ und des „verspäteten Handelns“ bei Innovationen und Umsetzung dar. 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. In Summe resultiert ein höherer Energieverbrauch und langfristig ein höherer Ausbaubedarf an erneuerbaren Energien und PtG/L-Importen. Damit einhergehend eine höhere Nachfrage nach Rohstoffen mit höheren Umweltbelastungen verbunden, die beim Rohstoffabbau, bei der Verarbeitung, der Nutzung und der Entsorgung entstehen. Die führt auch zur Notwendigkeit jährliche Absatzmärkte zwischenzeitlich zu überbauen (gegenüber dem langfristigen Absatz für das Repowering von Anlagen in einem eingeschwungenen nachhaltigen System), mit entsprechenden möglichen Risiken und Verwerfungen für Arbeitsmarkt und Wirtschaft, welche aber nicht Teil des Projektes sind. In GreenLate wird punktgenau und ohne Puffer die mit -95 % definierte weitestgehend Treibhausgasneutralität in 2050 erreicht (ohne LULUCF). Im Vergleich zu Szenarien, die nur eine 80 %-Reduktion erreichen, ist das GreenLate-Szenario jedoch weiterhin als ambitioniert anzusehen.

Die Ausrichtung der des Szenarios GreenLate wird sehr präzise und detailliert in UBA (2019a) definiert:

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 Anwendungsbereiche 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, erneuerbar 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 zum großen Teil 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 erneuerbaren 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 THG-Emissionen darstellen, 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 verstärkte Umsetzung von Verkehrsvermeidung und -verlagerung 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 erst verzögert angegangen werden. Dementsprechend ist der Schwerlastverkehr 2050 von Verbrennungskraftmaschinen geprägt. Die Kombination aus dem Festhalten an konventionellen Techniken, geringerem Fortschritt in effizientere Antriebstechniken und geringer Verkehrsvermeidung und -verlagerung führt zu hohen erneuerbaren Kraftstoffbedarfen.

Auch die Umstrukturierung der Landwirtschaft hin zu einer emissionsarmen, modernen und nachhaltigen Landwirtschaft erfolgt verzögert. Technische Treibhausgasreduzierungsmaßnahmen, 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-Kohlenstoffsink und verstärkten Biodiversitätsschutz. Wie in den GreenEe-Szenarien sind Waldbesitzer der öffentlichen Hand hierbei verstärkt Vorreiter und Impulsgeber.

1.3 Aufbau des Berichts

Der Bericht umfasst eine Kurzbeschreibung der Methodik, die Beschreibung der Annahmen und die Darstellung der Ergebnisse.

Kapitel 2 enthält eine methodische Kurzbeschreibung, die für das Verständnis des Berichts unerlässlich ist. Da die Methodik bereits in Dittrich et al. (2020) ausführlich beschrieben ist, wurde auf eine detaillierte Wiedergabe in diesem Bericht verzichtet.

Kapitel 3 dokumentiert die allgemeinen Annahmen. Dazu gehören Rahmenannahmen, die bereits im GreenEe-Szenario in Dittrich et al. (2020) gesetzt wurden und auch für dieses Szenario gelten, und die für das Verständnis dieses Berichts hilfreich sind. Die allgemeinen Annahmen, die sich im Vergleich zu GreenEe1 verändert haben, werden in dem Kapitel ausführlicher beschrieben.

Kapitel 4 beschreibt sektorspezifische Annahmen. Die Reihenfolge orientiert sich an der Systematik der Wirtschaftszweige und ist damit anders als in klassischen Darstellungen von Energieszenarien. Zunächst werden extraktive Sektoren, darunter die Landwirtschaft, dargestellt. Es folgt die verarbeitende Industrie und Dienstleistungen, zu denen der Abfallsektor gehört. Anschließend wird der Gebäude- einschließlich des Bausektor beschrieben. Dem schließt sich der Verkehrssektor an. Der zentrale Energiesektor, in den alle Annahmen der zuvor beschriebenen Sektoren fließen, bildet den Abschluss des Kapitels.

Im Kapitel 5 sind die Ergebnisse beschrieben. Zunächst wird die Energieversorgung dargestellt. Es folgen die aus den Annahmen resultierenden Treibhausgasemissionen, einschließlich der vorgelagerten und der kumulierten Treibhausgasemissionen. Anschließend werden der gesamtwirtschaftliche Rohstoffverbrauch sowie die Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen beschrieben. Den Abschluss des Kapitels bildet die resultierende Flächennutzung.

Kapitel 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und zieht ein kurzes Resümee.

2 Methodik

Das methodische Vorgehen bei der Berechnung des GreenLate-Szenarios ist identisch mit dem Vorgehen in GreenEe1. Die Berechnungen erfolgten im Rahmen eines Modellverbundes welche in Dittrich et al. (2020) dargestellt sind:

- ▶ der Verkehrsbereich in TREMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/tremod/>),
- ▶ der Wärmeverbrauch in Gebäuden in GEMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/gebaeudemodell/>),
- ▶ die Landwirtschaft in ALMOD (Website steht noch aus),
- ▶ das Energiesystem im kostenoptimierenden Energiesystemmodell SCOPE (siehe https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Branschueren/2018_F_SCOPE_Einzelseiten.pdf),
- ▶ die gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung sowie die vorgelagerten THG-Emissionen in URMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/urmod/>).

Weiterhin wurden teilweise umfangreiche Detailrechnungen zu Energie- und Rohstoffinputs sowie THG-Emissionen für folgende Sektoren und Bereiche durchgeführt:

- ▶ für die emissionsintensiven Industriesektoren Eisen/Stahl, NE-Metalle, Kalk, Zement, Nahrungsmittel, Holz/Papier, Chemie und Glas,
- ▶ für den Abfallbereich,
- ▶ für LULUCF (für den Fortbereich wurde auf Literatur zurückgegriffen),
- ▶ für rund 20 ausgewählte Schlüsseltechnologien, wobei hier der Fokus auf dem kumulierten Rohstoffbedarf lag,
- ▶ für materialintensive Sektoren, darunter vor allem der Hoch- und Tiefbau; auch hier lag der Schwerpunkt auf rohstoffbezogene Inputparameter.

Das Zusammenspiel der Modelle und Detailrechnungen erfolgt in mehreren Schritten: In einem ersten Schritt wurden die mit dem Umweltbundesamt abgestimmten Annahmen jeweils in TREMOD, GEMOD, ALMOD und in den Bereichen Industrie, Abfall, LULUCF (ohne den Forstbereich) und in den übrigen Sektoren modelliert bzw. berechnet. Dabei wurden die THG-Emissionen der Quellgruppen Landwirtschaft, Industrie, Abfall und LULUCF (ohne Wald) ermittelt und auf der Basis das Emissionsbudget für den Energiesektor festgelegt. Gleichzeitig wurde der Energiebedarf der Bereiche Verkehr, teilweise als feste Größen, Gebäude und aller übrigen Sektoren berechnet. Diese sowie Parameter der Schlüsseltechnologien und weitere, in den folgenden Kapiteln detailliert dargestellte Inputparameter stellten die Eingangsdaten für die kostenoptimierte Energierechnung in SCOPE dar. In diesem Schritt wurden relevante Auswirkungen eines Sektors auf einen oder mehrere andere Sektoren bereits berücksichtigt. Zur finalen Rohstoffrechnung wurden die überarbeiteten Werte aus TREMOD und SCOPE, einschließlich notwendiger Aktualisierungen von Schlüsseltechnologien und Infrastrukturbereichen an URMOD übergeben. Eine ausführliche Beschreibung der Modelle und des Zusammenwirkens im Modellverbundes findet sich unter Dittrich et al. (2020).

3 Allgemeine Annahmen

3.1 Rahmendaten

Verschiedene Rahmenannahmen wurden für alle Green-Szenarien getroffen. Für das Verständnis des vorliegenden Berichts werden die wesentlichen Rahmenannahmen zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung findet sich in Dittrich et al. (2020).

3.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Bei der Fortschreibung der Bevölkerungszahlen wurde für alle Szenarien einheitlich auf die 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung und dabei auf die Variante 1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ zurückgegriffen (Destatis 2015). Diese Projektion schreibt die Geburtenrate fort (1,4 Kinder je Frau), geht von einem moderaten Anstieg der Lebenserwartung auf 88,8 bzw. 84,8 Jahre für Mädchen bzw. Jungen aus, die in 2060 geboren werden. Die Nettozuwanderung in 2015 wird mit 500.000 angenommen, sie ist bis 2021 rückläufig, und verbleibt bei 100.000 pro Jahr bis 2060. Die resultierende Bevölkerung wird in folgender Tabelle wiedergegeben. Bis 2050 geht die Bevölkerung demnach um 12 % zurück.

Tabelle 2: Annahme zur Bevölkerungsentwicklung

	2010	2020	2030	2040	2050
Bevölkerung, gesamt in Tsd.	81.752	81.434	79.230	75.963	71.902

Quelle: Destatis, 2020 für 2010; Destatis (2015) für 2020 - 2050

3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung

Bezüglich der zu erwartenden zukünftigen Entwicklung stützt sich der vorliegende Bericht auf die Annahmen im THGND (UBA 2014). Eine wichtige Vorgabe bestand darin, den Industriestandort Deutschland in den Entwicklungsszenarien zu erhalten. Dazu wird zwischen den Jahren 2010 und 2050 ein jahresdurchschnittliches Wirtschaftswachstum (Bruttoinlandsprodukt (BIP), preisbereinigt) von 0,7 % p.a. unterstellt. Die unterstellten Wachstumsraten für die unterschiedlichen Sektoren sind im Bericht der GreenEe-Szenarien in Dittrich et al. (2020) ausführlich dokumentiert. Bei dem gleichzeitig unterstellten Rückgang der Bevölkerung führt das gesamtwirtschaftliche Wachstum zu einer etwa 50 %igen Steigerung des durchschnittlichen Einkommens pro Person bis zum Jahr 2050. Diese Annahme gilt einheitlich für GreenEe1 und GreenLate.

3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz

Im GreenLate-Szenario ist die Gesamtwirtschaft im Vergleich zu GreenEe1 allerdings etwas weniger dynamisch und innovativ. Dies drückt sich auch in der langsameren Umsetzung von Ressourceneffizienzmaßnahmen in Unternehmen aus. Für alle Sektoren und Dienstleistungen, für die nicht spezifische Annahmen getroffen wurden (siehe Kapitel 4), wurde unterstellt, dass die Materialeffizienz (also das Verhältnis der hergestellten Produkte zur Menge der eingesetzten Materialien) durchschnittlich um 0,9 % pro Jahr wächst, vergleichbar dem durchschnittlichen Anstieg in der EU-28. Der Unterschied zu den GreenEe-Szenarien (1,1 % p.a.) mag zunächst gering erscheinen, kumuliert über die Zeit bis 2050 ist der Unterschied jedoch erheblich.

Die unterstellten Ressourceneffizienzmaßnahmen in den verschiedenen Sektoren beinhalten sehr unterschiedliche Ansätze, die von Abfallvermeidung und -verwertung in der Produktion über Prozess- und Logistikoportimierungen bis hin zu Einsparungen und neuen

Geschäftsmodellen reichen. Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien ist die Marktdurchdringung dieser Ressourceneffizienzmaßnahmen im GreenLate-Szenario jedoch langsamer.

3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt

In allen Green-Szenarien wird angenommen, dass die europäischen Länder zur technologischen Entwicklung in Deutschland aufschließen. Dies gilt für alle Produktionstechnologien ebenso wie für die klimapolitischen Ambitionen. Die Annahme beinhaltet, dass die europäischen Länder in 2050 ebenso wie Deutschland eine (weitestgehende) Treibhausgasneutralität erreichen.

Für alle Länder außerhalb Europas wird in den meisten Green-Szenarien, außer GreenMe und GreenSupreme, angenommen, dass im globalen Mittel ein technologischer Rückstand von zehn Jahren in 2050 verbleibt. Die Länder holen folglich bis 2050 sehr schnell auf, jedoch nicht vollständig.

Insbesondere die zweite Annahme kann als ambitioniert eingeschätzt werden. Sie impliziert, dass es einen internationalen Ausgleich, einschließlich Technologie- und Wissenstransfer geben wird. Beide Annahmen gehen davon aus, dass der Klimawandel effektiv begrenzt werden kann, wenn alle Staaten eingebunden sind und ambitionierte Transformationen umsetzen.

3.1.5 Nutzung von Biomasse

In allen Green-Szenarien wird Primärbiomasse ausschließlich stofflich genutzt - Anbaubiomasse ab 2030 und Waldholz ab 2050. Biotische Abfälle können stofflich (z.B. für RC-Papier¹, als Ausgangsrohstoffe für die Chemie) und energetisch genutzt werden. Die unterstellten energetischen Potenziale der biotischen Reststoffe und Abfälle sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Die Herleitung wird in der Dokumentation der GreenEe-Szenarien ausführlich erläutert (vgl. Dittrich et al. 2020).

Tabelle 3: Energetische Nutzung der Biomassepotenziale bis 2050

	2030 TWh/a	2040 TWh/a	2050 TWh/a	Verwendung
Waldrestholz	25,8	12,9	0	Strom- und Wärmeversorgung
Altholz	33,8	33,8	33,8	Strom- und Wärmeversorgung
Stroh	15,9	8,4	0,0	als fortschrittliche Biokraftstoffe in Kraftstoffversorgung
Biogut	1,9	1,55	1,8	Als Biogas in Strom- und Wärmeversorgung
Grüngut	3	2,1	2,4	Als Biogas in Strom- und Wärmeversorgung

Quelle: Dittrich et al. (2020)

3.1.6 CCS und CCU

In allen Green-Szenarien werden keine technischen Maßnahmen zur Speicherung von Kohlendioxid (CCS) unterstellt.

Carbon Capture and Use (CCU) bedarf es für die Bereitstellung von strombasierten Kohlenwasserstoffen (in PtG/PtL- Techniken). Die Abscheidung und Nutzung von nicht vermeidbarem Kohlendioxid (CCU) als Ausgangsstoff für die nationale Produktion von PtG/PtL (synthetische kohlenstoffbasierte Energieträger) wird unterstellt, sofern dies entsprechend der

¹ RC = resin coated => kunststoffbeschichtet

kostenoptimierten Energiemodellierung in Deutschland stattfindet. Da aber national prioritär Wasserstoff für die Industrie erzeugt wird, sind die national erzeugten PtG-Mengen begrenzt und damit auch der Bedarf an CO₂-Quellen.

Die Abscheidung und Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff (CCU) mit Direct-Air-Capture-Anlagen wird international zur Bereitstellung von strombasierten Kohlenwasserstoffen unterstellt.

CCU in Verbindung mit atmosphärisch genutztem Kohlenstoff verursacht keine zusätzliche Treibhausgaswirkung und wird in der Studie bei den Treibhausgasbilanzen nicht mitbilanziert. CCU mit Kohlenstoff aus unvermeidbaren industriellen Produktionen wird in der Studie beim Quellverursacher bilanziert. Für nähere Informationen siehe TextBox 6-2 in UBA (2019c).

3.2 Emissionsziel 2030 und 2040

Die Treibhausgasminderungsziele in GreenLate sind gegenüber den anderen Green-Szenarien für die Stützjahre 2030 und 2040 geringer. Für das Ziel für 2030 wird das aktuelle Klimaziel Deutschlands mit – 55 % unterstellt, und 2040 ist mit -70 % gegenüber 1990 festgelegt.

Sektorziele entsprechend des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung werden nicht als Randbedingung für die Optimierung festgelegt, sondern als Ergebnis ausgewertet. Neben den direkten nationalen THG-Emissionen müssen auch Anstrengungen im Bereich des nichtenergetischen Verbrauchs (welcher über Müllheizkraftwerke als THG-Emissionen verspätet auftritt) und des internationalen Verkehrs unternommen werden. Deswegen werden PtG/L-Importe in 2030 und 2040 nicht auf nationale Emissionsziele angerechnet. Für nähere Informationen siehe UBA (2019a).

4 Sektorale Annahmen

4.1 Landwirtschaft

Das GreenLate-Szenario beschreibt im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien einen weniger ambitionierten Transformationspfad, es basiert jedoch weiterhin auf technischen Maßnahmen zur Treibhausgasreduktion. Dem GreenLate-Szenario liegt im Wesentlichen dasselbe Mengen- und Emissionsgerüst zugrunde wie den anderen Green-Szenarien (vgl. Dittrich et al. 2020). Im Detail sind die folgenden Annahmen hinterlegt, die auf (Umweltbundesamt 2014) zurückgehen:

- ▶ **Flächenentwicklung:** Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird durch zwei Faktoren beeinflusst: der Flächenneuanspruchnahme sowie der Wiedervernässung von Moorböden (siehe Kapitel 4.2). Insgesamt kommt es bis 2050 zu einem leichten Rückgang von Acker- und Grünlandflächen.
- ▶ **Technische Minderungsmaßnahmen:** Diese umfassen die Reduktion des Stickstoffdüngereinsatzes sowie Maßnahmen zum Wirtschaftsdüngermanagement. Durch die Erhöhung der Stickstoffeffizienz sowie die Erhöhung des Anteils des Ökolandbaus wird der Stickstoff-Gesamtüberschuss bis 2030 auf 50 kg N pro ha gesenkt. Außerdem wird ein steigender Anteil des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen vergoren, wobei die Gärreste gasdicht gelagert werden. Dies trägt zu einer starken Reduktion der THG-Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger bei.
- ▶ **Ökolandbau:** Gemäß dem Nachhaltigkeitsziel der Bundesregierung wird der Anteil des Ökolandbaus kontinuierlich bis 2050 auf 20 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche erhöht. Auf diesen Flächen wird kein mineralischer Stickstoffdünger verwendet.
- ▶ **Lebensmittelabfälle:** Eine Reduktion der Lebensmittelabfälle ist für die Landwirtschaftsemissionen nur dann relevant, wenn der Nachfragerückgang auf der Produktionsseite berücksichtigt wird. In allen Szenarien wurde eine kontinuierliche (lineare) Reduktion der Abfälle bis 2050 um 50 % unterstellt und die Produktion entsprechend angepasst.
- ▶ **Ernährung / Viehbestand:** Derzeit liegt der Verzehr tierischer Produkte weit über den Verzehrempfehlungen der DGE. Gleichzeitig ist der Viehbestand der größte Emittent in der Landwirtschaft. In den Green-Szenarien wurde eine Reduktion des Verzehrs hin zu den DGE-Empfehlungen angesetzt. Eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten hat allerdings nur dann einen Einfluss auf die THG-Emissionen, wenn entsprechend die Viehbestände angepasst werden. Im GreenEe1-Szenario wurden, analog zum Vorgehen in (Umweltbundesamt 2014), die Viehbestände nur soweit angepasst, dass die Emissionsziele der Landwirtschaft im Jahr 2050 erreicht werden. Dort ergibt sich aufgrund der geringeren Fleischverzehrs ein hoher Exportüberschuss mit einem Selbstversorgungsgrad von 345 %.

Im GreenLate-Szenario ergeben sich Unterschiede zu den anderen Szenarien lediglich in der Tierhaltung und sind bedingt durch eine weniger ambitionierte Abnahme der THG-Emissionen bis zum Stützjahr 2030 sowie zusätzliche THG-Emissionen im Zieljahr 2050.

Im Sinne der Szenariodefinition wurde das Zwischenziel im GreenLate-Szenario für 2030 auf -30 % gegenüber 1990 exogen festgelegt. Damit emittiert die Landwirtschaft in 2030 rund 55,5 Mio. t CO₂Äq. Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien wird ein weniger ambitionierter Abbau der Viehbestände unterstellt.

Für die Folgejahre bis 2050 wird von einer linearen Entwicklung und einem gesteigerten Ambitionsniveau ausgegangen. Im Zieljahr 2050 werden im GreenLate-Szenario mehr THG-Emissionen emittiert als in den anderen Green-Szenarien. Konkret sind es 11 % bis 36 %. Ursächlich ist dies begründet im geringeren Rückgang der Tierzahlen (insbesondere der Rinder), der unterstellt wurde. Die Viehhaltung ist die größte Emittentin von Treibhausgasen im Bereich Landwirtschaft, so dass die Reduzierung der Tierbestände die größte Stellschraube für landwirtschaftliche Treibhausgase darstellt. Für das GreenLate-Szenario verbleiben die Tierbestände im Stützjahr 2030 auf demselben Niveau wie im Basisjahr 2010. In den Folgejahren ab 2031 erfolgt dann eine lineare Reduktion der Tierbestände, wie in Tabelle 4 zusammengefasst.

Für den Ackerbau ergeben sich Unterschiede zu den anderen Szenarien durch veränderte Mengen an Wirtschaftsdünger aus der Viehhaltung, die zu veränderten THG-Emissionen aus der Bodenbewirtschaftung führen.

Des Weiteren werden Rückkopplungen der veränderten Entwicklungen der Tierbestände in der Nahrungsmittelindustrie berücksichtigt (siehe Kapitel 4.3.9). Aufgrund der höheren Fleischproduktion ergibt sich dort ein höherer Gesamtenergiebedarf.

Tabelle 4: Entwicklung der Viehbestände im GreenLate-Szenario

Tierplatzzahlen [Mio.]	2010	2030	2040	2050
Milchkühe	4,18	4,18	3,61	3,05
Sonstige Rinder	8,63	8,63	5,32	2,01
Schweine	22,2	22,2	18,6	15,0
Geflügel	129	129	126	124
Schafe	2,39	2,39	1,65	0,92
Pferde	0,46	0,46	0,48	0,50

Quelle: ifeu/IEE/SSG - ALMOD

Die Erosionsgefahr wird in den kommenden Jahrzehnten durch heftigere und häufigere Starkniederschläge aufgrund des Klimawandels so stark zunehmen, dass eine gute Bodenstruktur wichtig ist. Dies setzt eine Kalkung in mindestens dem Maße wie heute voraus. Es wurde daher angenommen, dass Kalkung in einem ähnlichen Niveau wie 2010 erfolgt, so dass die daraus resultierenden THG-Emissionen vom Basisjahres 2010 (1,7 Mio. t CO₂Äq) bis 2050 fortgeschrieben wurden. Dies stellt eine Abweichung vom GreenEe1-Szenario dar (Absenkung bis auf 1,5 Mio. t CO₂Äq in 2050), zeigt aber, dass Anpassungen an den Klimawandel berücksichtigt werden.

4.2 Flächennutzung und LULUCF

Die Flächenneuanspruchnahme ist im GreenLate-Szenario wie in allen Green-Szenarien rückläufig. In 2050 werden (netto) keine zusätzlichen Flächen für Siedlung und Verkehr umgewandelt. In 2030 bzw. 2040 liegt der Wert bei insgesamt 20 bzw. 10 ha pro Tag. In die Berechnungen der Rohstoffaufwände ist zusätzlich eingeflossen, dass weiterhin räumliche

Veränderungen stattfinden können und 7 ha pro Tag ent- und an anderer Stelle versiegelt werden können.

Das GreenLate-Szenario beschreibt im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien einen weniger ambitionierten Transformationspfad, was sich in einer langsameren Wiedervernässung von Mooren widerspiegelt. In den meisten Green-Szenarien wird die Wiedervernässung linear unterstellt (5 % pro Jahr ab 2020) und ist 2040 abgeschlossen. Im GreenLate-Szenario verläuft sie mit den folgenden Raten: bis 2022 wird jährlich nur 1 % wiedervernässt. Danach steigen die Raten auf 5 % pro Jahr bezogen auf die Ausgangsfläche im Jahr 2010 (die bis 2018 unverändert geblieben ist). Im Jahr 2050 werden noch rund 15 % der organischen Böden als extensives Grünland bewirtschaftet, da eine vollständige Wiedervernässung nicht möglich ist. Hier entstehen weiterhin THG-Emissionen von rund 4 Mio t CO₂Äq.

Die Annahmen zum Torfabbau sowie zur weiteren Landnutzung (Grünlandumbruch, Aufforstung / Entwaldung) sind in allen Green-Szenarien identisch, siehe Dittrich et al. (2020).

4.3 Industrie

GreenLate ist das insgesamt am niedrigsten ambitionierteste Szenario. Dies wird deutlich am Vergleich zu den GreenEe-Szenarien. In GreenEe1 und in GreenLate sind Produktionsmengen in identischer Höhe vorgegeben, aber der Technologieumbau ist unterschiedlich ambitioniert. Daher sind beide Szenarien vergleichbar.

Das verspätete Handeln im GreenLate-Szenario im Bereich Industrie führt dazu, dass Forschung und Entwicklung sowie die Einführung treibhausgasarmer oder -neutraler Techniken und Technikinnovationen verzögert werden. Zur Erreichung der Klimaziele 2050 wird vornehmlich auf bestehende Techniken zurückgegriffen. Nur Branchen mit Prozesstechniken, die kurze Erneuerungszyklen aufweisen (< 10 Jahre) können bis 2050 noch auf direkt strombasierte und damit systemische effiziente Energieträger umstellen. In Bereichen, in denen keine Alternativen für den notwendigen THG-Minderungsbeitrag bestehen, wie beispielsweise in der Stahlindustrie, erfolgt eine sehr späte Umstellung auf die treibhausgasneutrale Prozesstechnik. Weiterhin werden im GreenLate-Szenario Rohstoffeffizienz- bzw. Recyclingpotenziale nur zum Teil ausgeschöpft und damit im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien am geringsten. Die energiebedingten THG-Emissionen werden in allen Branchen durch vollständige Umstellung auf EE vollständig vermieden.

4.3.1 Stahlindustrie

In der Stahlindustrie erfolgt ein Technologieumbau. Die kokskohlebasierte Oxygenstahlroute wird vollständig zugunsten der Elektrostahlroute sowie einer neuen Primärstahlerzeugung auf Basis der wasserstoffbasierten Direktreduktion aufgegeben. Damit weiterhin eine bedarfsgemäße Menge an Stahl erzeugt werden kann, wird neben Schrott auch direkt reduziertes Eisen (direct reduced iron, DRI, auch Eisenschwamm genannt), eingesetzt. Eine entsprechende Produktion ist in Deutschland aufzubauen. Zur DRI-Herstellung wird Wasserstoff verwendet, der national produziert wird. (Für weitere Erläuterung siehe den Bericht zu GreenEe, Dittrich et al. (2020)). Die Wasserstoffproduktion kann dabei sowohl ortsnahe am Standort der Stahlproduktion erfolgen oder über Leitungsinfrastrukturen ermöglicht werden. Dies ist vornehmlich eine Herausforderung der Energieversorgung, um die erneuerbaren Erzeugungsstandorte effektiv mit den Verbrauchsstandorten zu verbinden.

Das verspätete Handeln im GreenLate-Szenario führt in der Stahlindustrie dazu, dass die Oxygenstahlproduktion langsamer als in den anderen Green-Szenarien verdrängt wird, v.a. ausgelöst durch die in geringerem Umfang zur Verfügung stehenden Schrottmengen, die durch

eine vermehrte DRI-Produktion ausgeglichen werden müssen. Für die DRI-Produktion ist im GreenLate-Szenario eine anteilige Nutzung von Methan als Reduktionsmittel angenommen vor dem Hintergrund, dass in bestehenden Anlagen bisher v.a. Erdgas eingesetzt wird und die entsprechende Prozesstechnik bei einem verspäteten Handeln zunächst auch bei neuen Anlagen Anwendung findet. Weiter bedingt das verspätete Handeln auch eine verminderte Steigerung der Energieeffizienz. Die wesentlichen Unterschiede zwischen dem GreenLate- und dem GreenEe1-Szenario zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Annahmen Stahlindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	• konstant 45 Mio. t Stahl; GreenLate wie GreenEe	
Schrottanteil	• linearer Anstieg bis 2030 auf 56 %, 2040 auf 61 % und 2050 auf 67 % (entsprechend 25-27,5-30 Mio. t)	• linearer Anstieg erst nach 2030 und nur auf 50 % in 2050 (entsprechend 21,6-22-22,5 Mio. t)
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> • linearer Rückbau der Oxygenstahlroute nach 2030 • vor 2030 ergibt sich Reduktion der Oxygenstahlproduktion durch steigenden Schrotteinsatz über die Elektrostahlroute (2030-2040-2050: 27,5-13,75-0 Mio. t Oxygenstahl) • parallel erfolgt linearer Aufbau der DRI-Anlagen (2030-2040-2050: 0-10-20 Mio. t DRI) mit Wasserstoff als Reduktionsmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • linearer Rückbau der Oxygenstahlroute nach 2030 • bis 2030 erfolgt keine Reduktion der Oxygenstahlproduktion, da Schrottmengen zum Ausgleich fehlen (2030-2040-2050: 30-15-0 Mio. t Oxygenstahl) • ab 2030 ausgleichender Aufbau der DRI-Anlagen (2030-2040-2050: 0-13,75-27,5 Mio. t DRI) anteilig mit Methan als Reduktionsmittel (2030-2040-2050: 75 %-50 %-25 %)
Endenergieverbrauch (EEV)	<ul style="list-style-type: none"> • Oxygenstahl: keine Änderung • Elektrostahl: lineare Reduktion des spezifischen Strombedarfs um 20 %, umgekehrt aber Mehrbedarf wegen Verzicht auf Kohlenstaub (nach 2030) und der Umstellung auf reinen Strombetrieb • Warmwalzwerk: lineare Reduktion des spezifischen Strombedarfs um 60 %, umgekehrt aber Mehrbedarf wegen Umstellung auf reinen Strombetrieb (induktive Erwärmung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Oxygenstahl: keine Änderung • Elektrostahl: lineare Reduktion des spez. Strombedarfs um 10 %, umgekehrt Mehrbedarf wegen Verzicht auf Kohlenstaub (nach 2030) und der Umstellung auf 50 % Strombetrieb und sonst weiterer Gaszuführung zur Schaumschlackenbildung • Warmwalzwerk: lineare Reduktion des spez. Strombedarfs um 40 %, umgekehrt Mehrbedarf wegen Umstellung auf 50 % Strombetrieb und sonst weiterhin Gaszuführung
Prozessbedingte THG-Emissionen	THG-Minderung wird erreicht durch: <ul style="list-style-type: none"> • lineare Reduktion Kohlenstaub • lineare Reduktion des Graphitelektrodenverbrauchs auf 3,6 kg CO₂/t Stahl • durch den Rückbau der Oxygenstahlroute bedingter Rückgang des Kalksteineinsatzes für Hochofen und Sinteranlage 	Spezifisch wie GreenEe1; absolut ergeben sich in Summe leicht höhere Werte bedingt durch die veränderten Mengenanteile der Oxygen- und Elektrostahlerzeugung

Quelle: eigene Zusammenstellung

Im Ergebnis bewirken die Verzögerungen einen höheren Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien. Im Zieljahr 2050 [2030/2040] liegt der Endenergieverbrauch bei 158 [149/148] TWh. Der Strombedarf ist im GreenLate-Szenario durch die verzögerte Umstellung im Pfad geringer und im Zieljahr 2050 leicht höher als in den anderen Green-Szenarien (2030-2040-2050: 11-50-124 TWh). Der zusätzliche Endenergiebedarf besteht entsprechend aus Gasbedarf, der im Pfad anteilig noch über Erdgas, aber im Zieljahr 2050 durch synthetisches Methan gedeckt wird.

4.3.2 Nicht-Eisen -Metallindustrie

Für die NE-Metallindustrie wurden die Metalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink untersucht. Für die jährlichen Produktionsmengen ist pauschal ein Wachstum von 0,7 % p.a. angenommen. Die wesentlichen Veränderungen in der NE-Metallindustrie sind die anteilige Umstellung auf strombetriebene Induktionsöfen, die Effizienzsteigerungen und die Steigerung der Sekundärerzeugung. Im GreenLate-Szenario bewirkt die Verzögerung eine verminderte bzw. verzögerte Umsetzung der drei Aspekte: Es wird weniger auf Strombetrieb umgestellt, die Effizienzsteigerung ist verzögert und die Steigerung der Sekundärerzeugung fällt geringer aus. Die wesentlichen Annahmen sowie Unterschiede zum GreenEe1-Szenario zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Annahmen NE-Metallindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> Wachstum 0,7 % p.a. (2030-2040-2050: 8,4-9-9,6 Mio. t NE-Metalle, davon Halbzeuge: 5,1-5,5-5,9 Mio. t) 	
Sekundäranteil gesamt (Cu, Al, Pb, Zn)	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg 2030-2040-2050: 62 %-78 %-90 % (3,35 Mio. t in 2050) 	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg 2030-2040-2050: 58 %-64 %-70 % (2,6 Mio. t in 2050)
Sekundäranteil andere NE-Metalle	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg des Sekundärmetallanteils an der Gesamtmenge Metall um 10 % in 2050 gegenüber 2010 	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg des Sekundärmetallanteils an der Gesamtmenge Metall um 5 % in 2050 gegenüber 2010
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> Nach 2030 lineare Umstellung gasbefeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene Induktionsöfen (Stromanteil Primärerzeugung konstant) in 2050 Anteil Strom für: Sekundärmetalle 65 %; Halbzeuge 65 % 	<ul style="list-style-type: none"> Nach 2030 lineare Umstellung gasbefeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene Induktionsöfen (Stromanteil Primärerzeugung konstant) in 2050 Anteil Strom für: Sekundärmetalle 50 %; Halbzeuge 56 %
Endenergieverbrauch (EEV)	Effizienzsteigerung um 30 % bis 2050: <ul style="list-style-type: none"> 1/3 bis 2030 1/3 bis 2040 1/3 bis 2050 	Effizienzsteigerung um 30 % bis 2050: <ul style="list-style-type: none"> 15 % bis 2030 35 % bis 2040 50 % bis 2050
Prozessbedingte THG-Emissionen	THG-Minderung wird erreicht durch: <ul style="list-style-type: none"> Umstellung auf inerte Anoden bei der Primäraluminiumerzeugung nach 2030: 63 % bis 2040, 100 % bis 2050 Kohlenstoff als Reduktionsmittel für Blei (Primär- und Sekundärerzeugung) und für Sekundärzinkerzeugung in 2050 in Höhe von 3,3 TWh (C_{syn}) 	Spezifisch wie GreenEe; absolut ergeben sich in Summe etwas höhere Werte: Mehrmissionen durch höheren Anteil Primäraluminiumerzeugung (Anoden aus Petrolkoks) überwiegen Mindermissionen durch geringeren Sekundärzinkanteil (weniger C als Reduktionsmittel; C_{syn} -Bedarf in 2050 in Höhe von 2,6 TWh)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Im Ergebnis bewirken die Verzögerungen einen höheren Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario, der im Zieljahr 2050 gegenüber dem GreenEe1-Szenario um 4 TWh höher ausfällt und 2030 – 2040 – 2050 bei 23 – 22 – 19 TWh liegt. Der anteilige Strombedarf ist im GreenLate-Szenario im Pfad höher als in allen anderen Green-Szenarien zum einen bedingt durch die verzögerte Effizienzsteigerung und zum anderen durch die jeweils höheren Anteile an Primärerzeugung (2030 – 2040 – 2050: 15 – 14 – 13 TWh). Im Zieljahr 2050 wird zwar die gleiche Effizienzsteigerung um 30 % erreicht, aber die weiterhin höheren Anteile an Primärerzeugung bewirken auch 2050 einen höheren Strombedarf. Der Endenergiemehrbedarf in 2050 entfällt etwa zur Hälfte auf höheren Strombedarf und ansonsten auf den verbleibenden Gasbedarf, der im Zieljahr 2050 durch synthetisches Methan gedeckt wird.

4.3.3 Gießereiindustrie

Für die Gießereiindustrie ist für die jährlichen Produktionsmengen pauschal ein Wachstum von 0,7 % p.a. für Eisen-, Stahl- und Temperguss (EST) und von 1,6 % p.a. für NE-Guss angenommen. Die wesentlichen Veränderungen in der Gießereiindustrie sind die Umstellung von fossil befeuerten Schmelzöfen auf strombetriebene, die Effizienzsteigerung und Steigerung der Metallausbringung. Im GreenLate-Szenario bewirkt die Verzögerung eine verminderte Umsetzung der drei Aspekte: Es wird verzögert und nicht vollständig auf Strombetrieb umgestellt, die Steigerung der Metallausbringung fällt geringer aus und in Konsequenz der beiden Aspekte resultiert eine geringere spezifische Effizienzsteigerung. Die wesentlichen Unterschiede zwischen dem GreenLate- und dem GreenEe1-Szenario zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Annahmen Gießereiindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	Wachstum <ul style="list-style-type: none"> EST 0,7 % p.a. (2030-2040-2050: 4,5-4,8-5,1 Mio. t) NE-Guss 1,6 % p.a. (2030-2040-2050: 1,2-1,4-1,6 Mio. t) 	
Metallausbringung	<ul style="list-style-type: none"> Steigerung auf 90 % in 2050 (Ausgangswert 65 %) 	<ul style="list-style-type: none"> Steigerung auf 75 % in 2050
Technologieumbau	Umstellung fossil befeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene: <ul style="list-style-type: none"> 1/3 bis 2030 1/3 bis 2040 1/3 bis 2050 	Umstellung von öl- und koksbefeuerten Schmelzöfen erst nach 2030, dann linear (50 % bis 2040, 100 % bis 2050). Umstellung von gasbefeuerten Schmelzöfen auf strombetriebene 10 Jahre verzögert (= in 2050 wird der Stand von GreenEe in 2040 erreicht)
Endenergieverbrauch (EEV)	Lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs auf 47 % des Ausgangswertes	Aus den Annahmen zum Technologieumbau und der Metallausbringung resultiert eine geringere Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bezogen auf den Ausgangswert: <ul style="list-style-type: none"> EST auf 63 % NE-Guss auf 72 %
Prozessbedingte THG-Emissionen	Keine	

Quelle: eigene Zusammenstellung

Im Ergebnis bewirken die Verzögerungen einen höheren Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario, der im Zieljahr 2050 gegenüber dem GreenEe1-Szenario um 2,5 TWh höher ausfällt.

Der Endenergieverbrauch liegt in 2030 – 2040 – 2050 bei 12 – 11 – 9 TWh. Der anteilige Strombedarf ist im GreenLate-Szenario im Pfad um 1,2 TWh höher als im GreenEe1-Szenario und liegt in 2030 – 2040 – 2050 bei 6 – 7 – 8 TWh. Der restliche Endenergiemehrbedarf entfällt auf Gas, das bedingt durch die nicht vollständige Umstellung von gasbefeuerten Schmelzöfen auf strombetriebene benötigt wird. Im Zieljahr 2050 wird der Bedarf durch synthetisches Methan gedeckt.

4.3.4 Chemische Industrie

Für die chemische Industrie wurde ein im Vergleich zur restlichen industriellen Produktion erhöhtes Wachstum von 2.2 % pro Jahr angenommen (für nähere Informationen siehe TextBox 5-2 „Einfluss der nicht-energetischen Bedarfe an Energieträgern“ in UBA (2019c). Prinzipiell wird von einer gleichbleibenden Technologie-Landschaft ausgegangen, mit den folgenden Ausnahmen:

- ▶ Übergang von fossilen Rohstoffen (Naphtha/Erdölderivate, Erdgas) zu erneuerbar erzeugten Kohlenwasserstoffen (die überwiegend importiert werden), vor allem synthetisches Methan, sowie zu Biomasse-basierten Rohstoffen, konkret:
 - a) Ammoniak-Produktion aus elektrolytisch erzeugtem H₂ anstelle von H₂ aus Dampfreformierung von Methan
 - b) Industrieruß-Herstellung aus Kohlenwasserstoffen basierend auf PtG/PtL-Synthesen
 - c) Kunststoff-Herstellung nutzt PtL-Methanol als Rohstoff (aus dem v.a. die Olefine Ethylen und Propylen, aber auch Aromaten wie Benzol und Toluol hergestellt werden können)
 - d) Wasserstoff für chemische Reaktionen (z.B. Hydrierungen) wird elektrolytisch gewonnen
 - e) Einsatz von PtG-Methan als Rohstoff und Brennstoff für Hochtemperatur-Anwendungen
- ▶ Flächendeckende Anwendung Bester Verfügbarer Technik (BVT) für die N₂O-Abscheidung in der Salpetersäure- und Adipinsäure-Herstellung (>98 % Abscheidung von N₂O)

Die in 2030 und 2040 benötigten Mengen synthetischer Rohstoffe wurden abgeleitet aus der überschlagsmäßig ermittelten Menge Produkte, die in 2030/2040 produziert werden und die in 2050 noch in Nutzung ist bzw. thermisch verwertet wird, damit in 2050 keine zusätzlichen fossilen THG-Emissionen zu berechnen sind. Beispiel: Lebensdauer Baustoffe > 20 Jahre; Somit ist der gesamte Anteil Kunststoffe im Bau schon ab dem Jahr 2030 auf der Basis synthetischer Ausgangsstoffe herzustellen.

Im GreenLate-Szenario wird eine verzögerte Umstellung der Technologien angenommen: Insbesondere die Umstellung der Wasserstoffherzeugung auf Elektrolyse verläuft langsamer als in GreenEe1, so dass im Jahr 2050 ein großer Teil des Wasserstoffs durch die alte Technologie Dampfreformierung dafür aber mit dem erneuerbaren Rohstoff PtG-Methan hergestellt werden muss. Darüber hinaus ist eine deutlich geringere jährliche Steigerung der Energieeffizienz von nur 0,56 % p.a. angenommen. Im Fall der Salpetersäure/Adipinsäure-Anlagen wurde keine verzögerte Einführung der verbesserten N₂O-Abscheidung angenommen, da die entsprechende BAT für Neuanlagen nicht wesentlich teurer und für Altanlagen im Zuge von Katalysator-Wechsel und allgemeinen Modernisierungsmaßnahmen leicht machbar sind. Die wesentlichen Unterschiede zwischen dem GreenLate- und dem GreenEe1-Szenario zeigt Tabelle 8.

Insbesondere die veränderte Annahme der Energieeffizienz-Steigerung führt zu einem Energie-Mehrbedarf von 50 TWh im Jahr 2050 gegenüber GreenEe. Darüber hinaus ergibt sich für die

Ammoniak-Synthese ein zusätzlicher Bedarf von PtG-Methan zur Wasserstoff-Erzeugung via Dampfreformierung.

Tabelle 8: Annahmen chemische Industrie im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien

	GreenEe1	GreenLate
Ammoniak-Produktion	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyse-H₂ statt Methan-Dampfreformierung 2040: 37,5 % Elektrolyse-H₂ 2050: 100 % Elektrolyse-H₂ 	Verzögerte (ab 2040) und geringere Umstellung: <ul style="list-style-type: none"> 2040: 6,2 % Elektrolyse-H₂ 2050: 70 % Elektrolyse-H₂, 30 % H₂ aus Dampfreformierung von importiertem PtG-Methan
Salpeter-/Adipinsäure	<ul style="list-style-type: none"> Flächendeckende Anwendung Bester Verfügbarer Technik (BVT) für N₂O-Abscheidung > 98 % 	
Industrieruß	<ul style="list-style-type: none"> aus PtG/PtL-Synthesen 	<ul style="list-style-type: none"> Verzögerte Umstellung, 10 Jahre später
Sonstige Emissionsquellen	<ul style="list-style-type: none"> Pauschale Annahme: lineare Abnahme THG-Emissionen 	<ul style="list-style-type: none"> Wie GreenEe-Szenarien
Kunststoffe	<ul style="list-style-type: none"> Umstellung auf PtL-Methanol als Rohstoff 	<ul style="list-style-type: none"> Wie GreenEe-Szenarien
Kunststoffrecycling	<ul style="list-style-type: none"> Fortschreibung aktueller Recyclingmengen 	<ul style="list-style-type: none"> Wie GreenEe-Szenarien
Allgemeine Annahmen Chem. Industrie (indirekte THG-Emissionen)	<ul style="list-style-type: none"> Steigende Energieeffizienz (1,5 %/a) PtG-Methan als Rohstoff H₂ aus Elektrolyse 	<ul style="list-style-type: none"> Energieeffizienz -Steigerung nur 0,56 %/a²

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.3.5 Zementindustrie

In allen anderen Green-Szenarien außer GreenLate erfolgt in der Zementindustrie ein Technologieumbau durch die Einführung von neuartigen zementähnlichen Bindemitteln, die rund 1/3 der prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung von Kalkstein verursachen, da zu deren Herstellung entsprechend geringere Mengen an Kalkstein benötigt werden. (Für weitere Erläuterung siehe den Bericht zu GreenEe, Dittrich et al. (2020)).

Im GreenLate-Szenario wird angenommen, dass es infolge verzögerten Handelns nicht gelingt die Herstellung neuartiger Bindemittel zur Marktreife zu bringen und zeitgerecht auszubauen (siehe Tabelle 9). In der Konsequenz gelingt keine THG-Minderung, sondern es kommt im Gegenteil zu höheren absoluten THG-Emissionen, da aufgrund des steigenden Klinkerfaktors für die rein konventionelle Bindemittelerzeugung mehr Kalkstein entsäuert werden muss.

Tabelle 9: Annahmen Zementindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> konstant 30,6 Mio. t Zement 	
Klinkerfaktor	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg auf 0,9 zur Kompensation von Hüttensand (Ausgangswert 0,77) 	
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> Neuartige Bindemittel 50 % in 2050, davon 20 % in 2030 und 50 % bis 2040 	<ul style="list-style-type: none"> keine neuartigen Bindemittel

² Abgeleitet aus Bazanella / Ausfelder (2017)

	GreenEe1	GreenLate
Endenergieverbrauch (EEV)	<ul style="list-style-type: none"> Brennstoffumstellung Kohle/Koks auf Gasfeuerung, 50 % bis 2030, 100 % bis 2040; lineare Reduktion EBS auf 0 % in 2050 zugunsten Gasfeuerung <p>Lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050 jeweils bezogen auf den Ausgangswert für konventionelle Bindemittel</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion thermischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 10 % und neuartige Bindemittel um 50 % Reduktion elektrischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 30 % und neuartige Bindemittel um 50 % 	<ul style="list-style-type: none"> Brennstoffumstellung Kohle/Koks auf Gasfeuerung wie GreenEe

Quelle: eigene Zusammenstellung

Als weitere Konsequenz der Nichteinführung ergibt sich ein höherer Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario, der im Zieljahr 2050 gegenüber dem GreenEe1-Szenario um 6 TWh höher ausfällt und bei 24 – 26 – 28 TWh in 2030 – 2040 – 2050 liegt. Der anteilige Strombedarf fällt im Pfad und im Zieljahr 2050 geringer aus, da der thermische Energiebedarf der konventionellen Bindemittelerzeugung nicht anteilig durch Strom gedeckt werden kann (2030 – 2040 – 2050: 3 – 2 – 2 TWh). Der Gasbedarf wird im Pfad noch anteilig über Erdgas gedeckt, dagegen im Zieljahr 2050 ausschließlich durch synthetisches Methan.

4.3.6 Kalkindustrie

Für die Kalkindustrie ergibt sich ein kontinuierlicher Rückgang des Bedarfs an Branntkalk durch den Rückbau von Kohlekraftwerken und Oxygenstahlwerken. Der Bedarf an Dolomitkalk bleibt konstant. Die wesentlichen Veränderungen in der Kalkindustrie bestehen im Technologieumbau durch die Umstellung der Kohlefeuerung auf Gasfeuerung und durch Effizienzsteigerungen.

Sowohl die Umstellung von Kohle auf Gas als auch die Steigerung der Energieeffizienz erfolgen in GreenLate 10 Jahre verzögert erst nach 2030. Die unterschiedlichen Eckdaten der beiden Szenarien zeigt Tabelle 10.

Tabelle 10: Annahmen Kalkindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> kontinuierlicher Rückgang Herstellung Branntkalk um 31 % bis 2050 auf 4,12 Mio. t Herstellung Dolomitkalk konstant (0,32 Mio. t) 	
Technologieumbau	<p>Brennstoffumstellung von Kohle auf Gasfeuerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> 50 % bis 2030 100 % bis 2040 	<p>Brennstoffumstellung von Kohle auf Gasfeuerung um 10 Jahre verzögert erst nach 2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> 50 % bis 2040 100 % bis 2050
Endenergieverbrauch (EEV)	<p>Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> Brennstoff linear um 20 % elektrisch linear um 10 % 	<p>Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050:</p> <ul style="list-style-type: none"> Brennstoff konstant bis 2030; dannach linear um 20 % Elektrisch konstant bis 2030; dannach linear um 10 %

	GreenEe1	GreenLate
		Lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs 10 Jahre zeitlich verzögert erst nach 2030 (= in 2050 wird der Stand von GreenEe in 2040 erreicht)

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu

Im Ergebnis bewirken die Verzögerungen einen leicht höheren Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario, der im Zieljahr 2050 gegenüber dem GreenEe1-Szenario um 0,1 TWh höher ausfällt und in 2030 – 2040 – 2050 bei 6 – 6 – 5 TWh liegt. Der anteilige absolute Strombedarf ist im GreenLate-Szenario im Pfad und im Zieljahr 2050 geringfügig niedriger als im GreenEe-Szenario und liegt bei 0,5 – 0,5 – 0,4 TWh in 2030 – 2040 – 2050. Der leichte Endenergiemehrbedarf entfällt auf Gas infolge der verzögerten Reduktion des spezifischen Energiebedarfs. Im Zieljahr 2050 wird der Bedarf durch synthetisches Methan gedeckt.

4.3.7 Glasindustrie

In der Glasindustrie bestehen wesentliche Veränderungen im Technologieumbau durch die Umstellung von zunächst Öl- auf Gasfeuerung und im Weiteren auf elektrische Schmelzöfen sowie durch die Steigerung der Energieeffizienz und des Scherbenanteils.

Im GreenLate-Szenario bewirkt die Verzögerung eine verminderte bzw. verzögerte Umsetzung der Aspekte: Die Umstellung auf elektrische Schmelzöfen beginnt erst nach 2030 und dann nur auf 15 % bis 2050. Die Effizienzsteigerung fällt geringer aus, was durch die geringere Steigerung des Scherbenanteils noch verstärkt wird. Die unterschiedlichen Annahmen im Vergleich zu GreenEe1 zeigt Tabelle 11.

Tabelle 11: Annahmen Glasindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> konstant 7,2 Mio. t Glas 	
Scherbenanteil	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg 2030-2040-2050: 45 %-54 %-69 % 	<ul style="list-style-type: none"> Anstieg 2030-2040-2050: 45 %-52 %-60 %
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> Umstellung Öl- auf Gasfeuerung bis 2030 Umstellung auf elektrische Schmelzöfen 2030-2040-2050: 10 %-30 %-100 % 	<ul style="list-style-type: none"> wie GreenEe (wegen Investition) Umstellung auf elektrische Schmelzöfen 0 % bis 2030, danach linear 15 % bis 2050
Endenergieverbrauch (EEV)	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion des EEV bis 2030 zunächst nur durch steigenden Scherbenanteil danach linear um 80 % bis 2050 	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion des EEV bis 2030 zunächst nur durch steigenden Scherbenanteil danach linear um 40 % bis 2050
Prozessbedingte THG-Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> THG-Minderung durch Steigerung Scherbenanteil (weniger CO₂ aus Zersetzung Carbonate bei Primärerzeugung) 	<ul style="list-style-type: none"> Durch geringere Steigerung Scherbenanteil höhere CO₂-Emissionen

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu

Im Ergebnis bewirken die Verzögerungen bzw. die verminderte Umsetzung einen höheren Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario, der im Zieljahr 2050 gegenüber dem GreenEe1-Szenario um rund 10 TWh höher ausfällt. Der Endenergieverbrauch liegt in 2030 – 2040 – 2050 bei 20 – 17 – 15 TWh. Der anteilige absolute Strombedarf ist im GreenLate-Szenario im Pfad und

im Zieljahr 2050 ebenfalls höher, in 2050 um rund 4 TWh gegenüber dem GreenEe1-Szenario, und liegt in 2030 – 2040 – 2050 bei 9,5 – 9,0 – 8,6 TWh. Die Differenz entfällt auf Gas, das im Zieljahr 2050 durch synthetisches Methan gedeckt wird.

4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie

Gemäß der Szenariendefinition wird im GreenLate-Szenario für die Zellstoff- und Papierindustrie davon ausgegangen, dass ein verspätetes Handeln dazu führt, dass die Entwicklung und Einführung Treibhausgasextensiver Techniken mit Verzögerung stattfindet. Dies hat zwei Entwicklungen zur Folge: eine geringere Steigerung der Energieeffizienz sowie eine nur teilweise Umstellung auf Strom. Die quantitative Ausgestaltung der Annahmen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Wie in allen anderen Green-Szenario werden die eigene biogene Reststoffe (z.B. Baumrinde, Ablauge, Klärgas aus eigenen Abwasserbehandlungsanlagen) energetisch genutzt (insgesamt hier 13,3 TWh). Außerdem wird aufgrund vermutlich schwankender Qualität für das Klärgas keine Einspeisung in das Gasverbundnetz angenommen.

Tabelle 12: Annahmen Zellstoff- und Papierindustrie im GreenLate-Szenario gegenüber GreenEe1

	GreenEe1	GreenLate
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> 24 000 000 t / a 	
Effizienzsteigerung	<ul style="list-style-type: none"> Sinken des spezifischen Energiebedarfs von 3,1 MWh / t (2010) auf 1,6 MWh / t (2050) 	<ul style="list-style-type: none"> langsames Sinken des spezifischen Energiebedarfs auf 1,9 MWh / t in 2050

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu

Die geringere Steigerungsrate der Energieeffizienz hat im Zieljahr 2050 einen höheren spezifischen Energiebedarf als in den anderen Green-Szenarien zur Folge. Bezüglich der Umstellung auf Strom wird in allen anderen Green-Szenarien davon ausgegangen, dass der Wärmebedarf zur Bereitstellung von Prozesswärme (Dampferzeugung) im Zieljahr 2050 komplett durch Strom gedeckt wird. Somit entfällt dort der Bedarf an erneuerbarem Methan. Im GreenLate-Szenario hingegen wird angenommen, dass keine vollständige Umstellung auf Strom erfolgt und somit ein Restbedarf an erneuerbarem Methan verbleibt. So werden im Zieljahr 2050 20,1 TWh regeneratives Methan und 5,49 TWh Strom benötigt.

4.3.9 Nahrungsmittelindustrie

Im GreenLate-Szenario werden für die Nahrungsmittelindustrie zwei Elemente umgesetzt: eine verzögerte Umsetzung Treibhausgas-extensiver Technologien sowie Anpassungen, die sich aus den Anpassungen im Landwirtschaftssektor ergeben.

Als Folge der Umsetzungsverzögerung kommt es zu einer geringeren Effizienzsteigerung als in den anderen Green-Szenario sowie zu einer nicht vollständigen Umstellung auf Strom. Bei letzterem wird der Annahme Rechnung getragen, dass nur Branchen mit Prozesstechniken, die kurze Erneuerungszyklen aufweisen (<10 Jahre) noch auf Endenergieträger umstellen können. Dementsprechend erfolgt in der Zucker- und Stärkeindustrie keine Umstellung auf Strom, sondern auf erneuerbares Methan. Alle anderen Unterbranchen stellen bis zum Zieljahr 2050 komplett auf Strom um.

Darüber hinaus erfolgt in Folge der Annahme zur Ernährung und Entwicklung der Viehzahlen eine Anpassung der Produktionsmengen in der Fleisch- und Milchwirtschaft im GreenLate-

Szenario auf 4,66 Mio. t Fleisch und 25,4 Mio. t Milch in 2050. Dementsprechend sind im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien in 2050 höheren Viehbeständen bzw. größere zu verarbeitende Fleisch- und Milchmengen in GreenLate (siehe auch Dittrich et al. 2020). Die wesentlichen Annahmen für die Nahrungsmittelindustrie sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Annahmen Nahrungsmittelindustrie im GreenLate-Szenario gegenüber GreenEe1

	GreenEe1	GreenLate
Umstellung der Energieträger auf Strom	<ul style="list-style-type: none"> Der Einsatz aller Endenergieträger wird bis 2030 um 30 % und bis 2050 um 70 % reduziert und durch Strom ersetzt. 	<ul style="list-style-type: none"> in der Zucker- und Stärkeindustrie erfolgt eine Umstellung auf erneuerbares Methan in allen anderen Unterbranchen eine Umstellung auf Strom wie in GreenEe
Effizienzsteigerung	<ul style="list-style-type: none"> Effizienzsteigerung bis 2050 um Faktor zwei 	<ul style="list-style-type: none"> geringere Effizienzsteigerung bis 2050 um Faktor 1,8 Umsetzungsgeschwindigkeit wie bei GreenEe1

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu

4.3.10 Textilindustrie

In der Textilindustrie liegen die wesentlichen Transformationsschritte in der Umstellung von zunächst Kohle- und Ölfeuerung auf Gasfeuerung und im Weiteren auf elektrische Dampferzeugung sowie in der Steigerung der Energieeffizienz.

Im GreenLate-Szenario bewirkt die Verzögerung eine verminderte bzw. verzögerte Umsetzung der Aspekte: Die Umstellung auf elektrische Dampferzeugung beginnt erst nach 2030 und nicht im gleichen Umfang wie in den GreenEe-Szenarien. Die Effizienzsteigerung erfolgt ebenfalls verzögert nach 2030, so dass in beiden Fällen im Zieljahr 2050 der Stand von GreenEe in 2040 erreicht wird. Die unterschiedlichen Eckdaten der beiden Szenarien zeigt Tabelle 14.

Tabelle 14: Annahmen Textilindustrie im GreenLate- gegenüber dem GreenEe1-Szenario

	GreenEe1	GreenLate
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> Umstellung Kohle-, Ölfeuerung auf Gas bis 2030 Umstellung auf Strom zur Dampferzeugung 2030-2040-2050: 70 %-85 %-100 % 	<ul style="list-style-type: none"> wie GreenEe Umstellung auf Strom zur Dampferzeugung erst nach 2030, dann linear 2040-2050: 72 %-85 %
Endenergieverbrauch (EEV)	Effizienzsteigerung um 50 % bis 2050: <ul style="list-style-type: none"> 1/3 bis 2030 1/3 bis 2040 1/3 bis 2050 	Effizienzsteigerung <ul style="list-style-type: none"> um 10 Jahre verzögert (=erst nach 2030) dann linear (= in 2050 wird der Stand von GreenEe in 2040 erreicht)

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu

Im Ergebnis bewirken die Verzögerungen bzw. die verminderte Umsetzung einen höheren Endenergieverbrauch im GreenLate-Szenario, der im Zieljahr 2050 gegenüber dem GreenEe-Szenario um rund 1,1 TWh höher ausfällt und in 2030 – 2040 – 2050 bei 7 – 6 – 5 TWh liegt. Der anteilige absolute Strombedarf ist im GreenLate-Szenario im Pfad zunächst geringer aufgrund der verzögerten Umstellung auf elektrische Dampferzeugung, im Zieljahr 2050 dann aber um

0,3 TWh höher gegenüber dem GreenEe-Szenario (2030 – 2040 – 2050: 3,9 – 4,2 – 4,4 TWh). Die Differenz entfällt auf Gas, das im Zieljahr 2050 durch synthetisches Methan gedeckt wird.

4.3.11 F-Gase und sonstige THG-Emissionen

Die nichtenergetischen THG-Emissionen der F-Gasen und Lachgas sind in GreenLate gleich zu GreenEe1 angenommen und in Dittrich et al. (2020) dargestellt.

4.3.12 Fahrzeugbau

Die Annahmen zur Batterietechnologie und zum Leichtbau in der KfZ-Industrie wurden ebenso aus GreenEe1 übernommen (Dittrich et al. 2020). Veränderungen ergeben sich durch die Anzahl der nachgefragten Fahrzeuge im Pfad und in 2050 (siehe 4.6.2).

4.4 Abfall und Abwasser

Im Sektor Abfall und Abwasser werden nach der Systematik der Nationalen Inventarberichterstattung (NIR) ausschließlich nicht-energetische THG-Emissionen berichtet. Für Deutschland sind folgende Bereiche relevant³:

- ▶ Deponie,
- ▶ Kompostierung und Vergärung organischer Abfälle,
- ▶ mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) und
- ▶ Abwasserbehandlung.

Im Kontext der Szenariengestaltung werden im Bereich Abfall und Abwasser ausschließlich Änderungen vor dem Hintergrund veränderter Verhaltensstrukturen oder Effizienzannahmen angenommen. Das bedeutet, dass sämtliche technische Maßnahmen im Bereich der Abfall- und Abwasserbehandlung in allen Green-Szenarien identisch sind und im Bericht der GreenEe-Szenarien dargelegt sind (siehe auch Dittrich et al. 2020). Veränderungen ergeben sich ausschließlich durch Veränderungen der Abfallmengen, die aus den exogenen Vorgaben zur Materialeffizienz resultieren. Im GreenLate-Szenario bedingt das verspätete Handeln eine negative Materialeffizienz und damit steigende Abfallmengen in manchen der Bereiche (siehe Tabelle 15).

Die energetische Nutzung von Abfallmassen ist im Sektor Energie beinhaltet. Für die Szenarien wird jeweils die gleiche Abfallmengenänderung angenommen wie hier für die nicht-energetischen Bereiche. Grundsätzlich wird über alle Szenarien hinweg unterstellt, dass der Anteil des fossilen Kohlenstoffs in Abfallmengen zur energetischen Verwertung bis 2050 auf Null reduziert wird und die korrelierenden Annahmen im Bereich Industrie, konkret chemische Industrie, getroffen werden.

Tabelle 15: Annahmen Abfall und Abwasser im GreenLate- gegenüber dem GreenEe-Szenario

	GreenEe-Szenarien	GreenLate
Deponie	<ul style="list-style-type: none"> • Kontinuierliche Minderung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 gegenüber 1990 	<ul style="list-style-type: none"> • wie GreenEe

³ Aus Abfallverbrennung werden für Deutschland keine nicht-energetischen THG-Emissionen berichtet.

	GreenEe-Szenarien	GreenLate
	<ul style="list-style-type: none"> Rückbau und aerobe Stabilisierung bei 30 % der Ablagerungen 	<ul style="list-style-type: none"> wie GreenEe (= Materialeffizienz hat keinen Einfluss auf die Ablagerungen)
MBA/MBS	<ul style="list-style-type: none"> ab 2020 kontinuierliche Umrüstung von MBA zu MBS-Anlagen 	kontinuierlich steigende Abfallmenge zur Behandlung gegenüber GreenEe
Kompostierung/-Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> ab 2020 gesteigerte getrennte Erfassung der Organikabfälle und ab 2020 kontinuierlich steigender Anteil zur Vergärung 	<ul style="list-style-type: none"> 2030 104 % von GreenEe 2040 106 % von GreenEe 2050 108 % von GreenEe (resultierend aus Änderungen der Materialeffizienz)
Abflusslose Gruben	<ul style="list-style-type: none"> kontinuierliche Reduzierung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 durch Erhöhung des Anschlussgrades der Bevölkerung 	
Kläranlagen	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung der Proteinzufuhr von 36 auf 28 kg/E/a bis 2050 	

Quelle: eigene Analysen ifeu

4.5 Gebäude

GreenLate ist das insgesamt am niedrigsten ambitionierteste Szenario. Dies wird deutlich am Vergleich zu den GreenEe-Szenarien wobei GreenEe1 und GreenEe2 sich im Gebäudebereich nicht unterscheiden. Die grundsätzlichen Maßnahmen und Stellschrauben im Gebäudewärmebereich in GreenLate sind im Folgenden vergleichend zu den GreenEe-Szenarien gegenübergestellt.

Tabelle 16: Überblick Annahmen im Gebäudewärmebereich GreenLate im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe1 und 2	GreenLate
Sanierungstiefe	Höher; Ab 2025 - Gebäude ohne Dämmrestriktionen: <ul style="list-style-type: none"> Dach um 0,1 W/m²K Wand 0,15 W/m²K 	Geringer als in GreenEe; Ab 2025 - Gebäude ohne Dämmrestriktionen: <ul style="list-style-type: none"> Dach um 0,1 – 0,2 W/m²K Wand 0,14 – 0,25 W/m²K
Sanierungsrate	im Mittel von 2011 bis 2050: 2,6 % <ul style="list-style-type: none"> 2011-2020 2021-2030 2,4 % 2031-2040 2,7 % 2041-2050 3,2 % 	Im Mittel von 2011 bis 2050 1,6 % <ul style="list-style-type: none"> 2011-2020 2021-2030 1,7 % 2031-2040 1,8 % 2041-2050 1,6 %
Wohnfläche 2050	bewohnte Wohnfläche WG: <ul style="list-style-type: none"> 3,55 Mrd. m² ~ 49,4 m²/Kopf 	Wohnfläche: <ul style="list-style-type: none"> 3,83 Mrd. m² ~ 53 Mrd. m²/Kopf (ESG)
Nutzfläche 2050	<ul style="list-style-type: none"> Nutzfläche NWG: 2,54 Mrd. m² 	
Rebound nach Sanierung (mehr Heizungsverbrauch)	<ul style="list-style-type: none"> Angleichung des realen Verbrauchs an den gerechneten Bedarf 	
Wärmepumpen (Resultat aus Narrativ und anderer Annahmen zu Anteil Fernwärme u.a.)	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2050 80 % Wärmepumpen 	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2050 65 % WP geringere JAZ über alle Jahre
Gaskessel und Solarthermie	<ul style="list-style-type: none"> Schnellerer Austausch fossiler Bestandskessel 	<ul style="list-style-type: none"> Langsamerer Austausch fossile Bestandskessel

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe1 und 2	GreenLate
	<ul style="list-style-type: none"> Kein PtH im Pfad, 2050 keine Brennwertkessel, Solarthermie läuft ab 2020 aus 	<ul style="list-style-type: none"> 2050 noch 15 % Gasbrennwertkessel mit Heizstab oder Solarthermie
Wärmenetze (Anteil Endenergie HH+GHD)	<ul style="list-style-type: none"> 2030: 15 % 2050: 20 % 	<ul style="list-style-type: none"> 2030: 13,7 % 2050: 20 %

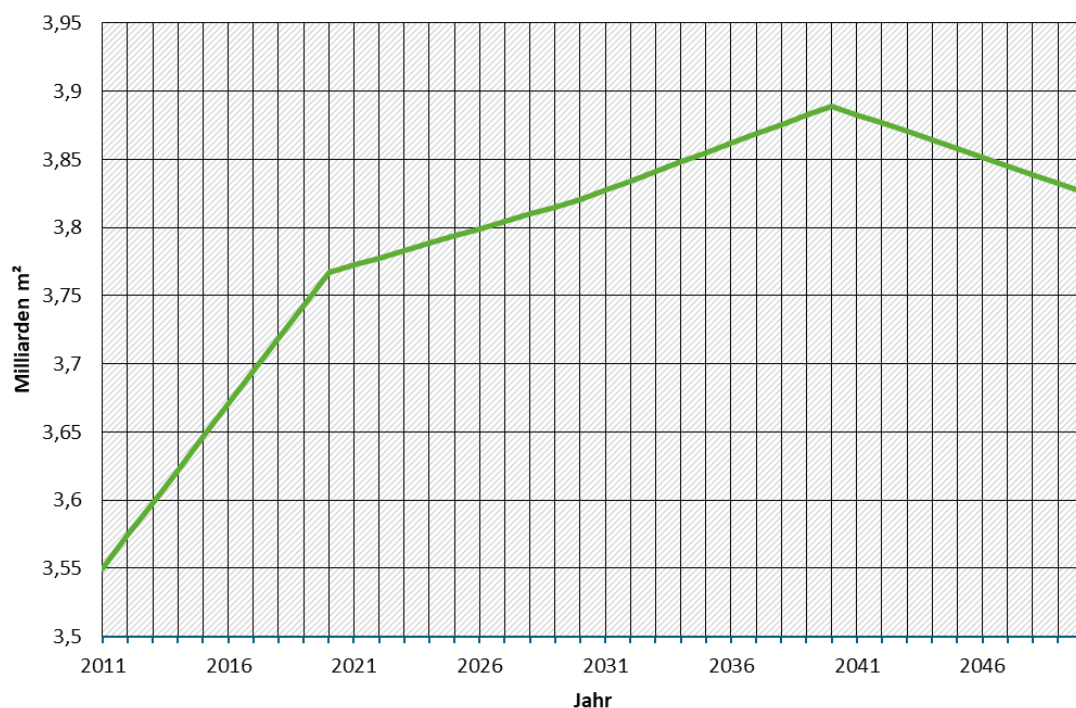
Quelle: eigene Zusammenstellung

4.5.1 Entwicklung des Gebäudewärmeverbrauchs

4.5.1.1 Entwicklungen von Wohn- und Nutzflächen in GreenLate

Im Szenario GreenLate gelingt es nicht, den bisherigen Trend der steigenden Pro-Kopf Wohnfläche zu brechen. Die bewohnte und damit auch beheizte (d.h. abzüglich des Leerstandes) Pro-Kopf-Wohnfläche steigt in GreenLate von 44,4 m²/Kopf im Jahr 2011 auf 53 m²/Kopf im Jahr 2050. Dieser Anstieg entspricht auch den Annahmen der Szenarien der Energieeffizienzstrategie Gebäude (BMW 2015). Die Bevölkerungsentwicklung ist in allen Green-Szenarien identisch, sie zeigt ab dem Jahr 2040 einen derartigen Rückgang, dass die resultierende Gesamtwohnfläche trotz der weiter steigenden Pro-Kopf-Wohnfläche rückläufig ist (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Verlauf der bewohnten Wohnfläche im GreenLate



Quelle: eigene Darstellung ifeu

Die Annahmen zu den Wohnungszu- und abgängen ist wie folgt (Abriß- bzw. Neubaurate in % der Wohnfläche):

- 2020-2030: 0,56 % bzw. 0,7 %
- 2030-2040: 0,31 % bzw. 0,5 %
- 2040-2050: 0,56 % bzw. 0,4 %.

Die Fläche in Nichtwohngebäuden wird in allen Green-Szenarien identisch angenommen. Sie steigt demgemäß von ca. 2,28 Mrd. m² im Jahr 2011 auf 2,54 Mrd. m² in 2050.

4.5.1.2 Entwicklung von Sanierungsraten und –tiefen

Im Szenario GreenLate liegt die Sanierungsrate im zeitlichen Mittel bei 1,6 % im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien mit rund 2,6 % also deutlich niedriger. In GreenLate sinkt die Anzahl von Renovierungen, die ohne energetische Sanierungen stattfinden, im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien nicht auf Null ab und die Sanierungstiefen weisen somit ein niedrigeres Niveau auf. Hochambitionierte energetische Sanierungen (Sanierungen des Sanierungsstandards 2) spielen im GreenLate nur eine marginale Rolle: sie haben einen Anteil unter 2 % an den gesamten Sanierungen. Die U-Werte des Sanierungsstandards 1 entsprechen in GreenLate bis zum Jahr 2024 im Niveau den Anforderungen der EnEV 2016. Ab dem Jahre 2024 verbessern sich die U-Werte bei fast allen Bauteilen der Gebäudetypen um 10-15 %.

Tabelle 17 die U-Werte des Sanierungsstandards 1. Bei Gebäuden mit Dämmrestriktionen werden entsprechende Aufschläge auf den U-Wert berücksichtigt.

Tabelle 17: Sanierungsniveaus bei Gebäuden ohne Dämmrestriktionen

U-Werte des Sanierungsstandards 1 bei Gebäuden ohne Dämmrestriktionen im GreenLate	bis zum Jahr 2024				ab dem Jahr 2025			
	Dach	Wand	Keller	Fenster	Dach	Wand	Keller	Fenster
Bauperiode des Gebäudes								
1300-1994	0,24	0,28	0,35	1,3	0,2	0,25	0,32	1,1
1995-2001	0,2	0,28	0,35	1,3	0,19	0,25	0,32	1,1
2002-2011	0,2	0,28	0,25	1,3	0,19	0,25	0,25	1,1
2012-2020	0,17	0,2	0,25	1,1	0,17	0,19	0,25	1,0
2021-2035	0,13	0,16	0,25	0,9	0,13	0,14	0,2	0,6
2036 -2050	0,1	0,14	0,19	0,6	0,1	0,14	0,19	0,6

Quelle: eigene Analysen, GEMOD, ifeu

4.5.1.3 Annahmen zu Innentemperaturen und Nutzerverhalten

Die Innentemperaturen und das Nutzerverhalten in GreenLate sind identisch zu GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe.

4.5.1.4 Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlagen

Der Zuwachs von Wärmerückgewinnungsanlagen ist geringer als in den anderen Green-Szenarien. Für Wohngebäude wird 2050 eine Durchdringungsrate von knapp 30 % statt rund 60 % erreicht, bei Nichtwohngebäuden beträgt sie in 2050 64 % statt 79 %.

4.5.1.5 Resultierender Nutz- und Endenergiebedarf im Zielpunkt 2050

Mit obigen Annahmen wird wiederum der Nutzwärme- und Endenergiebedarf der Gebäude für Raumwärme und Warmwasser mit dem Modell GEMOD in Jahresschritten modelliert. Er liegt bei Wohngebäuden im Jahr 2050 um ca. 100 TWh höher als im GreenEe (GreenEe1 = GreenEe2), für Nichtwohngebäude um ca. 50 TWh. Der resultierende Endenergiebedarf in GreenLate liegt um 80 % höher als in GreenEe.

Tabelle 18: Modellierter Nutzenergie- und Endenergiebedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden 2050

[TWh/a]	Nutzenergie GreenLate			Endenergie GreenLate (zu decken durch Strom, Umgebungswärme, Fernwärme)			Endenergie GreenEe
	RW	WW	SUMME	RW	WW	SUMME	
Wohngebäude	218,3	40,1	258,4	245,3	71,1	316,4	209,6
Nichtwohngebäude	114,5	8,7	123,2	124,9	22,8	147,7	94,0
- GHD	95,9	5,7	101,6	103,8	16,2	120	81,3
- Industrie	18,6	3	21,6	21,1	6,6	27,7	12,7

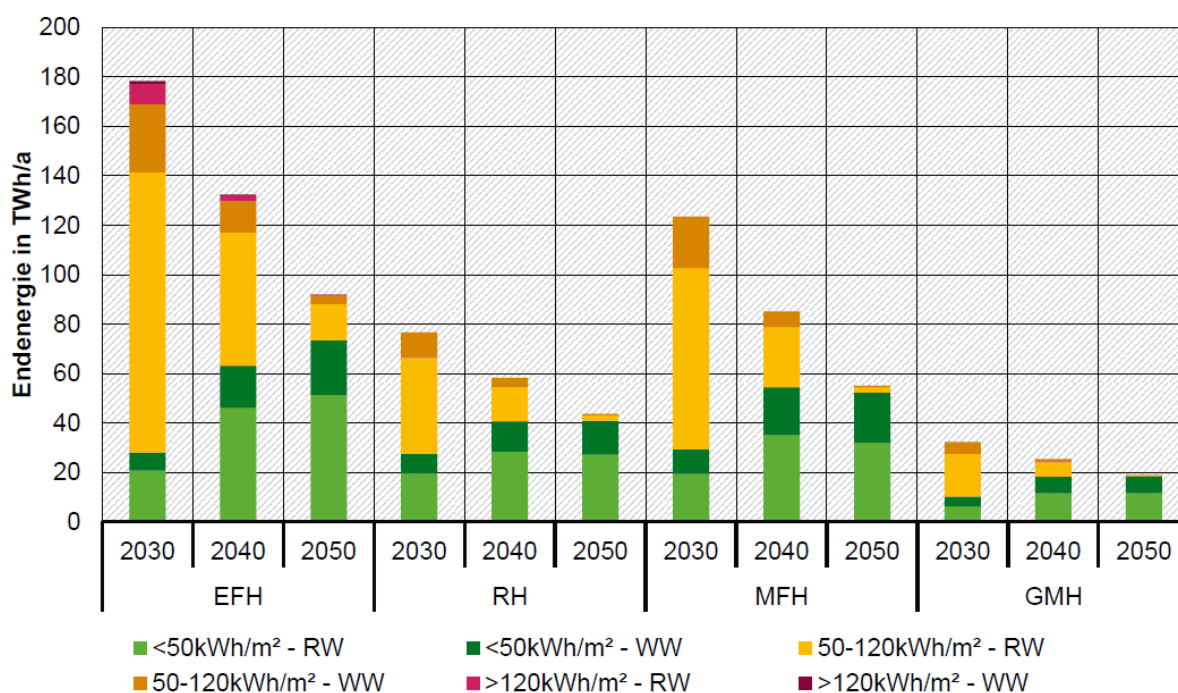
Quelle: eigene Analysen, GEMOD, ifeu

Für die Übergabe an das Modell SCOPE werden die energetischen Zustände der Gebäude wiederum in die drei Effizienzklassen hoher Dämmstandard (Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme von $\leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$), mittlerer Dämmstandard (Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme von $50 - 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) und geringer Dämmstandard (Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme von $> 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) aggregiert.

Die Differenzierung nach Gebäudetyp und Sanierungszustand in GreenLate ist gegenüber GreenEe hin zu einem geringeren Anteil von Gebäuden mit hohem Dämmstandard verschoben. So beträgt z.B. der Flächenanteil von sehr effizienten Gebäuden mit einem Nutzwärmeverbrauch von Raumwärme bis zu $50 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ in GreenLate 2030 34 % gegenüber 43 % in GreenEe über alle Gebäudetypen (25 % gegenüber 32 % bei Wohngebäuden) und im Jahr 2050 liegt er bei 64 % gegenüber 92 % (59 % gegenüber 93 % bei Wohngebäuden).

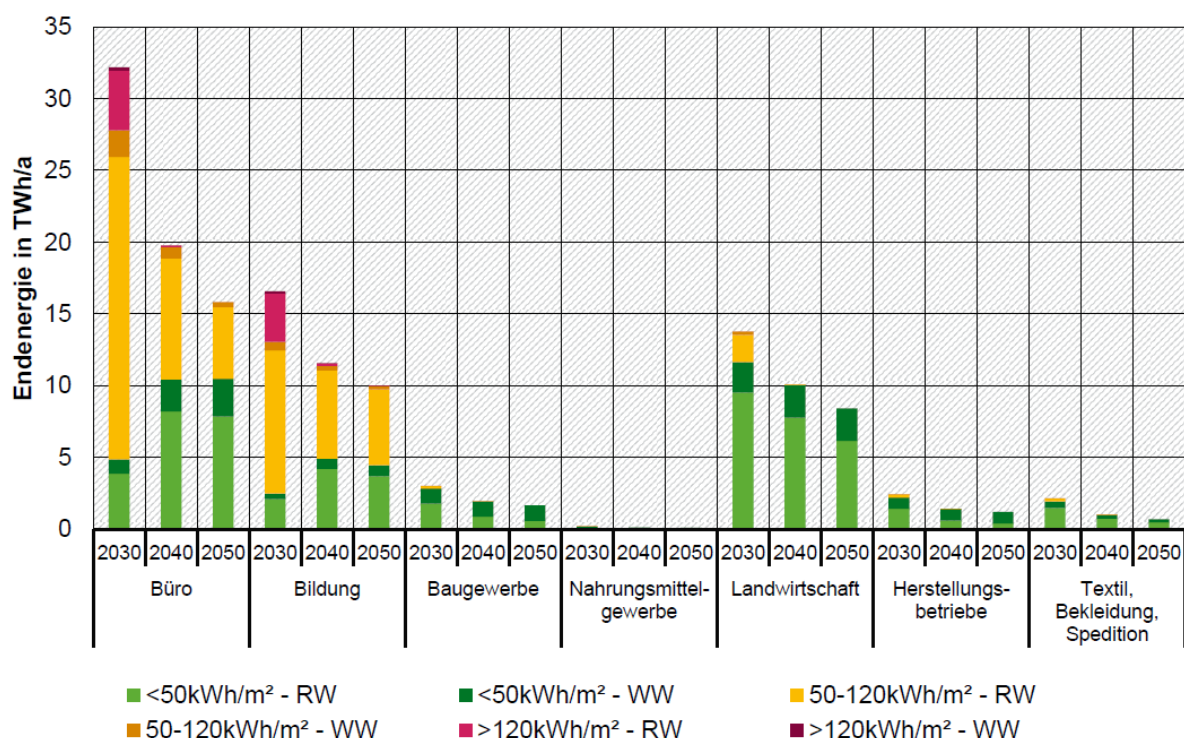
Im Folgenden ist die Entwicklung der Endenergie differenziert nach Gebäudetypen dargestellt. Die Daten befinden sich im Anhang.

Abbildung 2: Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLate – Endenergie



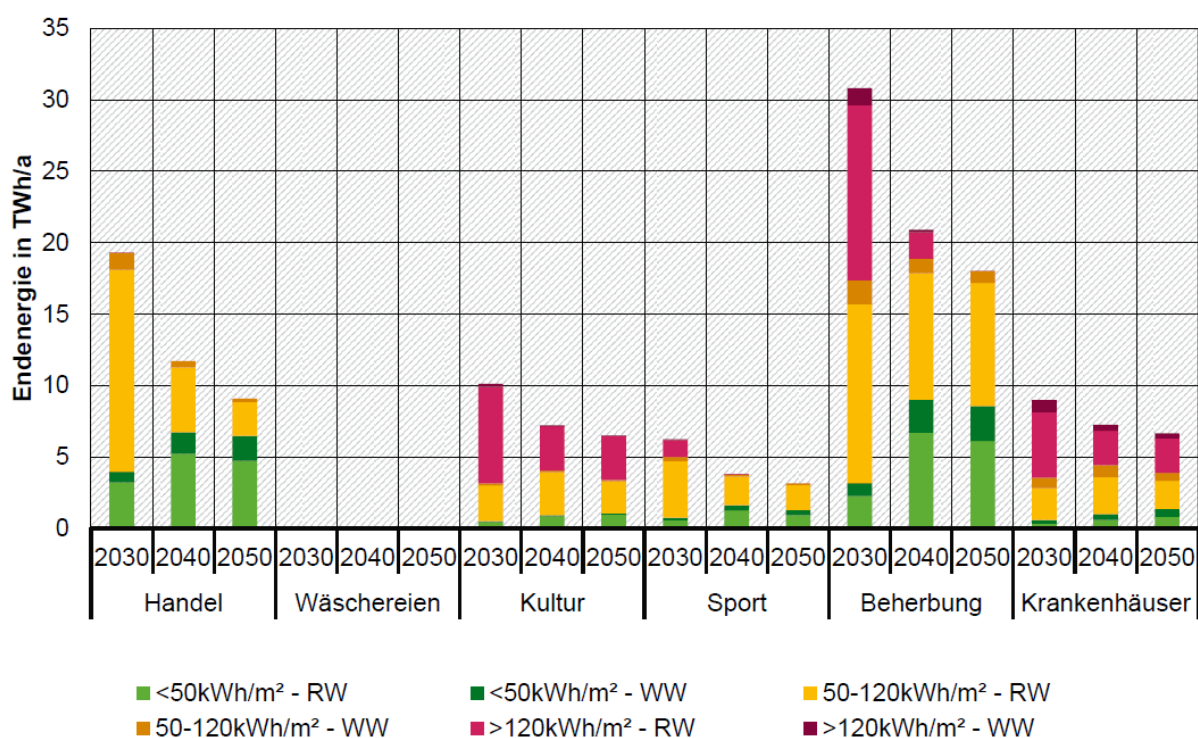
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Abbildung 3: Unterteilung der Nichtwohngebäude 1 in Effizienzklassen in GreenLate – Endenergie



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Abbildung 4: Unterteilung der Nichtwohngebäude 2 in Effizienzklassen in GreenLate – Endenergie

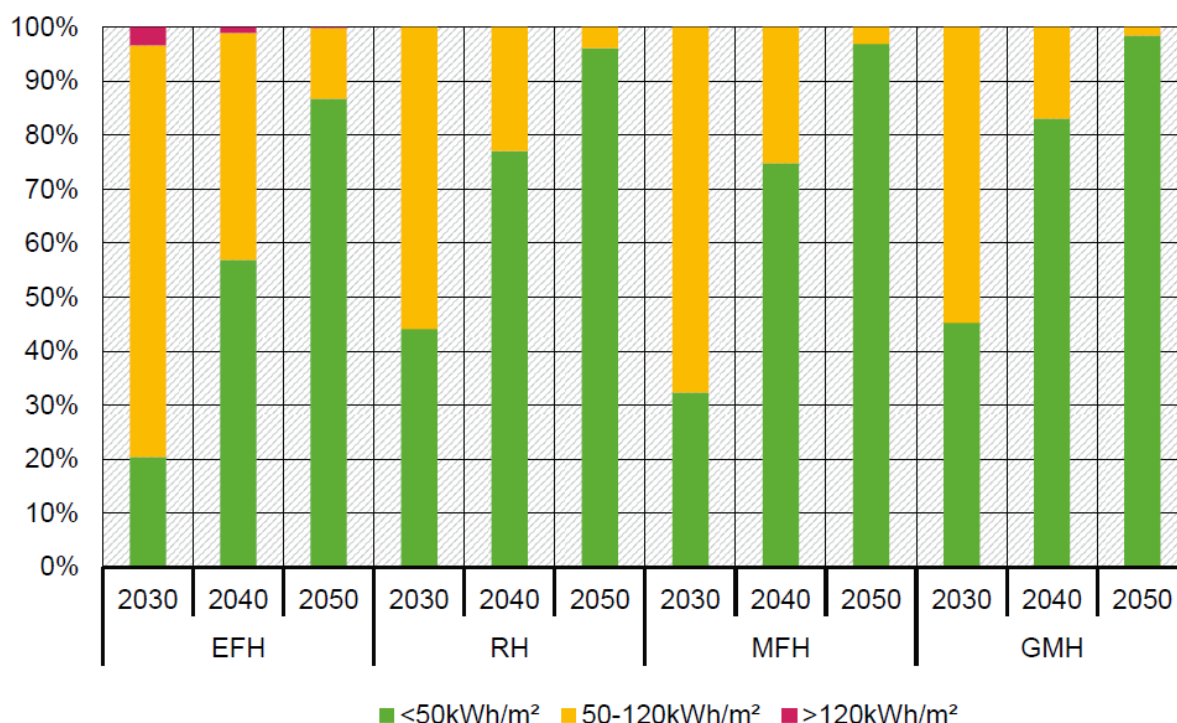


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Die Gebäudeanzahl differenziert nach Gebäudetypen ist als relativer Wert und damit als Maß für die Gebäudesanierung im Folgenden in der Entwicklung dargestellt. Die Gebäudeanzahl ist in

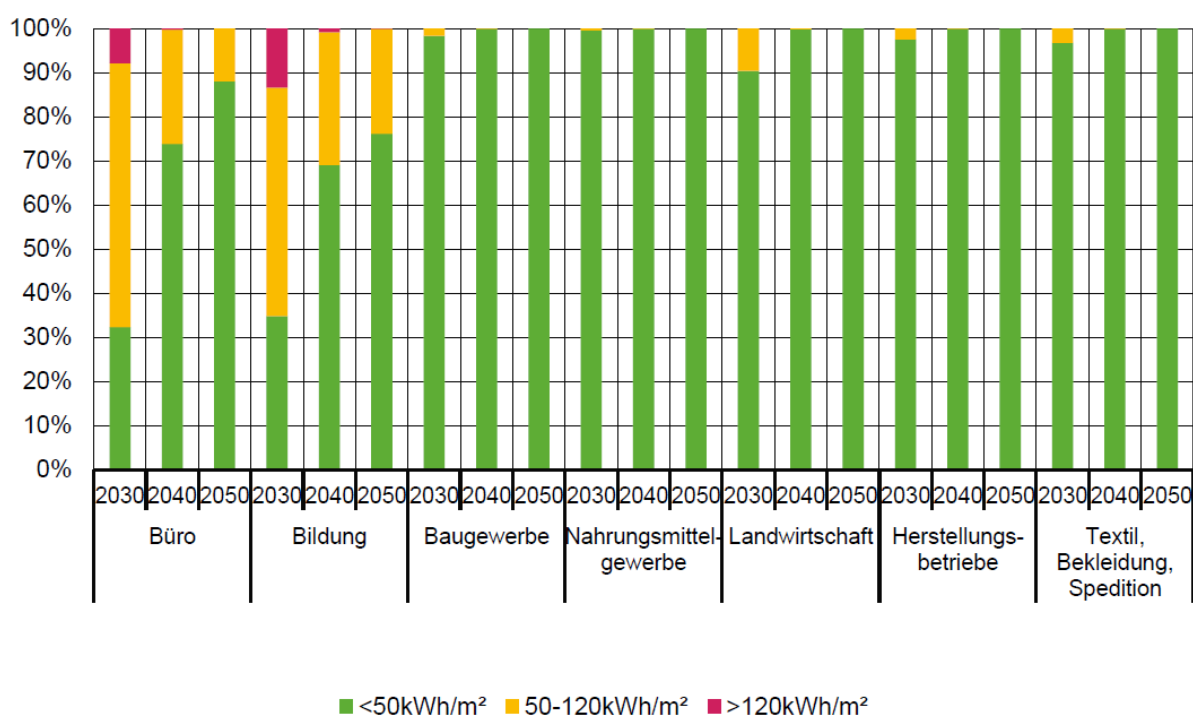
diesem Fall auch repräsentativ für die Flächen in den jeweiligen Effizienzklassen. Die detaillierten Daten sind im Anhang dargestellt.

Abbildung 5: Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLate – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Abbildung 6: Unterteilung der Nichtwohngebäude 1 in Effizienzklassen in GreenLate – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Abbildung 7: Unterteilung der Nichtwohngebäude 2 in Effizienzklassen in GreenLate – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

4.5.2 Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes

Im GreenLate wird der überalterte Heizungsanlagenbestand langsamer abgebaut als in allen anderen Green-Szenarien. Die Restnutzungsdauern von Heizungskesseln mit Baujahr ab 1995 bis 2011 liegen beispielsweise im Schnitt um 6 Jahre höher als in den GreenEe-Szenarien. Die Nutzungsdauer von Kesseln mit Baujahr 1980-1994 beträgt wie in den GreenEe-Szenarien nach 2011 nur 11 Jahre, da diese Kessel andernfalls zu stark überaltern.

Damit werden Bestandskessel im GreenLate ab dem Jahr 2016:

- ▶ im Mittel noch 11 Jahre betrieben, wenn es sich um Anlagen mit Baujahr 1980-1994 handelt
- ▶ im Mittel noch 21 Jahre betrieben bei Anlagen mit Baujahr 1995-2004
- ▶ mit Baujahr zwischen 2004-2011 im Mittel noch 25 Jahre betrieben.

Neue fossile Kessel werden jedoch wie in allen Green-Szenarien lediglich 20 Jahre lang betrieben, da andernfalls im Heizungsanlagenbestand 2050 ein zu hoher Anteil an Gaskesseln resultieren würde.

In Folge erhöht sich das Heizungsanlagenmarktvolumen zwischen heute und 2025 auf 1,2 Mio. statt wie beispielsweise in den GreenEe-Szenarien auf 1,4 Mio. Wärmeerzeuger pro Jahr. Im Mittel über die Zeit beträgt der Heizungsanlagenaustausch und Einbau in neuen Gebäuden 5,1 %.

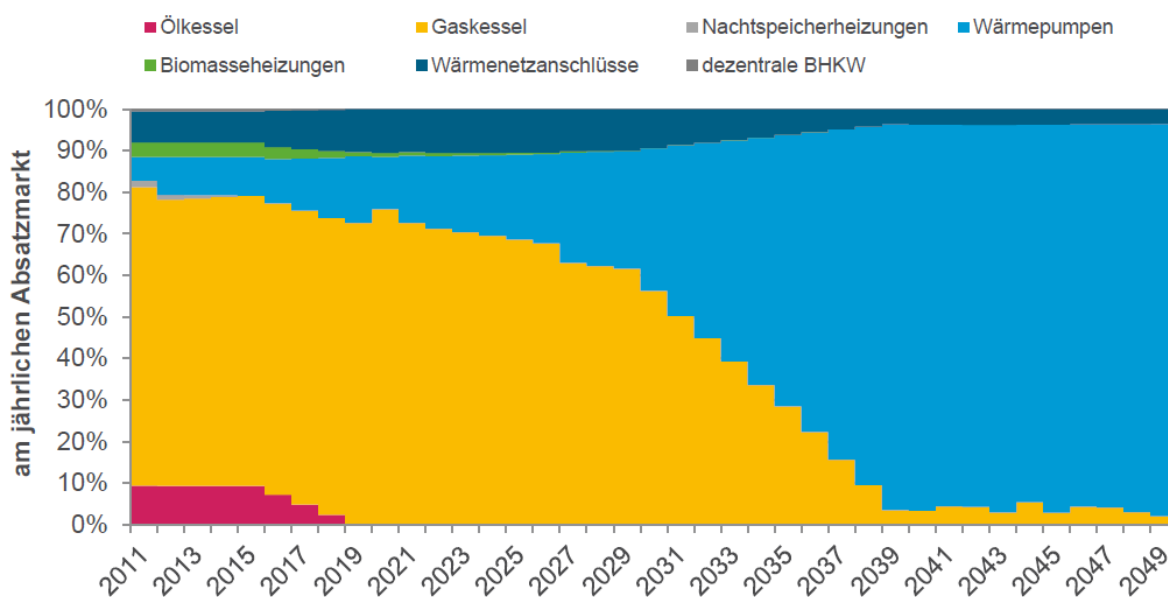
Während Ölkessel wie in allen Green-Szenarien ab 2020 nicht mehr eingebaut werden, geht der Anteil von Gaskesseln an den neu eingebauten Wärmeerzeugern im GreenLate deutlich langsamer zurück. Als Randbedingung für die Gesamtsystem-Optimierung in SCOPE wurden dabei 2 Szenarien zu unterschiedlich schnellen Markthochläufen für Wärmepumpen in GEMOD modelliert. In den GreenEe-Szenarien wächst beispielsweise der Anteil von Wärmepumpen an den neu installierten Heizungsanlagen bis 2030 im Obergrenzen-Szenario (so schnell wie

möglich) auf 50 %, in GreenLate hingegen auf 30 %. Für die Teilmenge der Erdwärmepumpen an den eingebauten Wärmepumpen wächst der Anteil im GreenLate bis 2030 im Obergrenzen-Szenario auf 45 % statt wie beispielsweise in den GreenEe-Szenarien auf über 55 %. Ab 2040 liegt er im GreenLate bei 52 % gegenüber 62 % in den GreenEe-Szenarien. In SCOPE wird dann der notwendige Wärmepumpenausbau zwischen Ober- und Untergrenze in Hinblick auf das Klimaziel ermittelt und wird im Ergebnissteil dargestellt.

Der Marktanteil dezentraler Biomasseheizungen geht wie in allen Green-Szenarien bis 2030 auf null zurück, zugunsten des Einsatzes der Biomasse in zentralen Wärmenetzfeuerungen (vor allem KWK).

Solarthermieranlagen auf Gebäuden werden in den anderen Green-Szenarien ab 2020 nicht mehr zugebaut, da Dachflächen sukzessive mit Photovoltaikanlagen belegt werden, und die Kombination PV-Wärmepumpe direkt im Sommerhalbjahr und in Verbindung mit dem Stromnetzanschluss ganzjährig die höhere Effizienz aufweist. Da in GreenLate in unsanierten Gebäuden noch Gaskessel verbleiben, bietet hier die Solarthermie eine anteilige Option Wärme auf einem höheren Temperaturniveau bereit zu stellen. Im GreenLate verbleibt deshalb der Solarthermiebeitrag zur Endenergie in heutiger Höhe in Verbindung mit Gaskesseln (Hauptwärmeerzeuger in Abbildung 8).

Abbildung 8: Simulierte Marktanteile von Heizungstechnologien (Hauptwärmeerzeuger) in GreenLate – Obergrenze für Wärmepumpen (so schnell wie möglich) aus GEMOD als Input für SCOPE



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Der Anschlussgrad an Wärmenetze steigt im GreenLate bis 2030 auf 13,7 %. Es wird unterstellt, dass - bedingt durch die höhere Wärmeabsatzdichte, welche den ökonomischen Betrieb von Wärmenetzen begünstigt - in 2050 der gleiche Anteil netzgebundener Wärmebereitstellung wie in GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe für Haushalte und GHD erreicht werden kann. Dieser liegt bei 20 %.

Ein geringeres Ambitionsniveau im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien spiegelt sich auch im deutlich niedrigeren Anteil von Flächenheizungen wider. In den GreenEe-Szenarien beispielsweise werden die Vorlauftemperaturen durch Ausstattung mit Flächenheizungen und Niedertemperaturradiatoren im Jahr 2050 bei 90 % der Gebäude auf maximal 35-40°C abgesenkt (im Jahr 2030 sind bereits ein Drittel der Gebäude mit Niedertemperaturheizungen ausgestattet), im GreenLate sind 2030 nur 27 % der Gebäude und 2050 62 % der Gebäude, die

mit Flächenheizungen oder Niedertemperaturradiatoren ausgestattet sind. Ferner steigen die Leistungszahlen von Neuanlagen weniger schnell. Erreichbar sind Steigerungen beispielsweise durch Einsatz drehzahl geregelter Wärmepumpen sowie der Optimierung der Wärmeübertrager und der Regelstrategien.

Auch die Effizienz der Techniken ist in GreenLate im Green-Szenarienvergleich entsprechend der Charakteristik am geringsten. In den GreenEe-Szenarien beispielsweise steigt die Leistungszahl von Neuanlagen-Erdsondenwärmepumpen im Punkt B0W35 (die Leistungszahl bei einer Quelltemperatur der Sole von 0°C und einer Senktemperatur von 35°C) bis 2050 auf 5,7, die von Luftwärmepumpen auf 4,85. Im GreenLate geschieht die Steigerung bis 2050 bei Erdwärmepumpen auf 5,1 und von Luftwärmepumpen auf 4,35. Die Jahresarbeitszahlen in den GreenEe-Szenarien ergeben sich aus dem kombinierten Einfluss der niedrigeren Leistungszahl und einem niedrigeren Anteil Flächenheizungen. Sie sind in Tabelle 20 dargestellt.

4.5.3 Optimierung der Wärmebereitstellung

Die Optimierung der Wärmebereitstellung in SCOPE beinhaltet im Fall der Wärmenetzversorgung die Investitionsentscheidung aus einer Auswahl von Technikkombinationen:

- ▶ moderne KWK-Systeme mit Großwärmepumpen (KWK+GWP),
- ▶ moderne KWK-Systeme mit saisonaler Solarthermie (KWK/HWK + Solarthermie),
- ▶ Geothermie oder ländliche ganzjährige Solarthermie (Geothermie).

Andere Systeme sind dagegen fest vorgegeben

- ▶ KWK-Bestandsanlagen (KWK-Bestand),
- ▶ Müll oder Biomasse-Bestandsanlagen (Müll),
- ▶ Quartiers-Wärmepumpen für Nahwärme (Quartiers-WP).

Im Falle der Objektversorgung erfolgt die Optimierung in SCOPE in 2030 und 2040 im Rahmen eines vorgegebenen Korridors für den Anteil von Wärmepumpen gegenüber Gaskessel und zwischen Sole- und Luft-Wärmepumpe. Andere Systeme oder Sekundärwärmeerzeuger sind dagegen fest vorgegeben (Solarthermie, Öl, Biomasse, Direktstrom). Die konkrete Ausgestaltung der Wärmeversorgung obliegt der Kostenoptimierung in Rückkopplung mit dem Gesamtenergieversorgungssystem.

4.5.3.1 Optimierung der Wärmebereitstellung in Wärmenetzen

Die netzgebundene Versorgung erfolgt mit Müllheizkraftwerken, Großwärmepumpen, Solarthermie und Geothermie. Aufgrund des eingeschränkten Rückverstromungspotenzials wird der Einsatz von KWK weitgehend reduziert. Neben Müll und Geothermie betrifft dies die Kombination von KWK mit Abwasser-Großwärmepumpen. Im Bereich neuer Netze werden dagegen Großwärmepumpen oder saisonale Solarthermiesysteme unterstellt, welche auch weitestgehend ohne den Einsatz von Brennstoffen auskommen. Im Transformationspfad für die Stützjahre 2030 und 2040 müssen einerseits Bestands-KWK-Anlagen berücksichtigt werden, sowie die Wärmeerzeugung aus Biomasse-KWK und ein höheres Müllaufkommen. Für Tiefengeothermie wird aufgrund der Fragen zur Verfügbarkeit von petrothermalen Verfahren von einem kontinuierlichen Wachstum bis 2050 ausgegangen. Für alle anderen Techniken wird im Jahr 2030 ein Markthochlauf unterstellt der bis 2040 abgeschlossen ist. Diese ermöglicht, dass konventionelle KWK-Systeme nur für eine begrenzte Zeit mit einer Lebensdauer von ca.

20 Jahren (Fokus große BHKW) als Brückentechnologie zugebaut werden, aber 2050 nicht mehr vorhanden sind.

Im Szenario GreenLate sind aufgrund der geringeren Gebäudesanierung bzw. des hohen Gesamtverbrauchs die unterstellten Potenzialgrenzen der effizienteren Technologien für Müll-HKW, Wärmepumpen mit und ohne KWK, monovalente Tiefengeothermie und Solarthermie nicht ausreichend, um das angenommene maximale Potenzial von 20 % Wärmenetzen am Wärmemarkt zu decken. Im Folgenden ist das Potenzial für Systeme inkl. die zusätzliche Kombination von KWK mit Elektrodenkessel dargestellt.

Tabelle 19: Maximales Versorgungspotenzial der Wärmenetzversorgung in 2050 als Input für SCOPE

	Versorgung über bestehende urbanen Wärmenetze (inkl. Verdichtung)	Versorgung durch neue urbane Netze	Versorgung durch neue ländliche Netze	GreenLate SUMME	GreenEe1 SUMME
Anteil an Gebäudewärme für HH und GHD	12,9 %	4,2 %	2,9 %	20,0 %	20,0 %
Endenergie [TWh _{th}]	56,3	18,3	12,7	87,3	58,2
Netzverluste	10 %	10 %	10 %		
Wärmeerzeugung [TWh_{th}]	62,6	20,4	14,1	97,0	64,7
Müll-HKW [TWh _{th}]	4,2	0,0	0,0	4,2	4,2
Kombination Groß-WP + KWK [TWh _{th}]	28,3	0,0	0,0	28,3	28,3
Quartiers-WP [TWh _{th}]	0,0	7,0	0,0	7,0	7,0
Tiefengeothermie [TWh _{th}]	9,3	6,6	4,6	20,5	20,5
- Tiefengeothermie KWK [TWh _{th}]	6,2	4,4	3,0	13,6	13,6
- Tiefengeothermie Heizwerk [TWh _{th}]	3,1	2,2	1,5	6,8	6,8
Solarthermie-ganzjährig [TWh _{th}]	0,0	0,0	4,8	4,8	4,8
<i>Differenz (KWK+HKW+Solar+PtH) [TWh_{th}]</i>	<i>20,9</i>	<i>6,8</i>	<i>4,7</i>	<i>32,3</i>	<i>0,0</i>

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

4.5.3.2 Objektversorgung

Der Bereich der dezentralen Wärmebereitstellung macht im Jahr 2050 80 % des Gebäudewärmebedarfs für Haushalte und Gewerbe aus. 65 % der Gebäudewärme erfolgt über Wärmepumpen. Dabei wird für die einzelnen Gebäudetypen zwischen Sole- und Luft-Wasser-Wärmepumpen unterschieden. Das theoretische technische Potenzial für Erdwärmesonden beträgt im Wohngebäudebereich im Jahr 2050 im Mittel über alle Gebäudetypen ca. 70 % (zur Methodik siehe Mellwig et al. (2017)⁴). Aufgrund von Umsetzungshemmnissen wird pauschal ein Potenzial von im Mittel 50 % des Gebäudewärmebedarfs für Haushalte und Gewerbe unterstellt und basierend auf eigenen Annahmen zwischen den verschiedenen Gebäudetypen differenziert (Tabelle 20). Die Annahmen zu den Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen sind innerhalb der Gebäudetypen zwischen dem Effizienzstandard der Gebäude differenziert.

⁴ Mellwig et al. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich, Studie gefördert durch das BMWi, noch unveröffentlicht

Tabelle 20: Anteil von Wärmenetzen und JAZ (gemittelter Wert für TWW und RW) von Wärmepumpen in 2050 je Gebäudetyp in GreenLate

Gebäudetyp	Wärmenetzanteil	Potenzial Sole-WP	JAZ Sole-WP	JAZ Luft-WP
Wohngebäude				
EFH	11 %	45 %	4,4	3,7
RH	8 %	51 %	4,4	3,7
MFH	25 %	41 %	4,3	3,7
GMH	25 %	41 %	4,4	3,8
Nichtwohngebäude				
Büro	34 %	30 %	4,4	3,7
Bildung	51 %	23 %	4,4	3,7
Baugewerbe	9 %	50 %	4,3	3,8
Nahrungsmittelgewerbe	8 %	49 %	4,2	3,9
Landwirtschaft	5 %	51 %	4,4	3,8
Herstellungsbetriebe	8 %	50 %	4,3	3,8
<i>Industrie</i>	0 %	51 %	4,4	3,8
Textil, Bekleidung, Spedition	10 %	47 %	4,5	3,8
Handel	11 %	48 %	4,5	3,7
Wäschereien	8 %	50 %	4,3	3,8
Kultur	50 %	19 %	4,5	3,7
Sport	53 %	21 %	4,4	3,7
Beherbergung	32 %	22 %	4,4	3,7
Krankenhäuser	61 %	15 %	4,4	3,7

Quelle: eigene Analysen, GEMOD, ifeu

4.5.4 Weitere rohstoffbezogenen Annahmen im Hochbau

Für die Berechnung der Rohstoffaufwendungen im Hochbau wurde im GreenLate-Szenario auf die Studie von Deilmann et al. (2017) zurückgegriffen. Konkret wurde das Szenario BAU genutzt, wobei die von Deilmann et al. (2017) errechneten Rohstoffmengen entsprechend der in GreenLate unterstellten Bauentwicklungen angepasst wurden. Das BAU-Szenario geht von einer Konstanz der Verteilung von EFH/ZFH und MFH sowie der Recyclingquoten der Baustoffe aus. Es schreibt ferner den gegenwärtigen Anteil an Holzhäusern bei EFH/ZFH bzw. MFH mit 15 % bzw. 2 % bis 2050 fort.

In GreenLate wurde ferner die Struktur der bei Wohn- und Nichtwohngebäuden genutzten Dämmmaterialien fortgeschrieben, deren Mengen ebenso wie die Mengen für Flachglas nicht aus Deilmann et al. (2017) übernommen, sondern entlang der in Kap. 4.5.1.2 aufgeführten Annahmen zu Dämmungen einschließlich energetischen Sanierungen in GEMOD berechnet wurden. Die Materialmengen für die energetischen Sanierungen sind in Tabelle 21 aufgeführt. Die Rohstoffmengen summieren sich auf insgesamt 3,08 Mio. Tonnen in 2050.

Tabelle 21 Materialmengen für Dämmungen einschließlich energetischer Sanierungen [Tsd. Tonnen]

	2030	2040	2050
Wohngebäude			
Holzfaser und Cellulose	55,9	44,9	49,6
Mineralwolle	1.639,8	1.368,7	1.466,6
EPS, PUR und andere Schaumstoffe	392,2	312,9	361,3
Vakuumisolierpaneelen	0,9	0,8	0,9
Nichtwohngebäude			
Holzfaser und Cellulose	40,4	38,9	35,5
Mineralwolle	1.030,9	987,4	972,0
EPS, PUR und andere Schaumstoffe	236,2	220,9	192,5
VIP	0,4	0,4	0,3

Quelle: ifeu/IEE/SSG – GEMOD

4.6 Verkehr

4.6.1 Vermeidung und Verlagerung im nationalen Personenverkehr

GreenLate ist das insgesamt am niedrigsten ambitionierteste Szenario. Dies wird deutlich am Vergleich zu den GreenEe-Szenarien. In den GreenEe-Szenarien wurde die Verkehrsentwicklung im Personenverkehr insgesamt und für die einzelnen Verkehrsmittel an das Klimaschutz-Szenario in der Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050“ (UBA 2016a) angelehnt. In GreenLate wird entsprechend der Szenariencharakteristik demgegenüber ein stärkerer Anstieg der Verkehrsleistung angenommen, gleichzeitig fällt die Verlagerung auf öffentlichen Verkehr, Rad- und Fußverkehr geringer aus.

Bis zum Jahr 2030 entwickeln sich die Verkehrsleistungen in GreenLate analog zum Referenzszenario in UBA (2016a). In den folgenden Jahren bis 2050 werden auch in GreenLate Vermeidung und Verlagerung im Personenverkehr erreicht, diese bleiben aber weiterhin hinter den anderen Green-Szenarien zurück. Pro Jahr werden 50 % der GreenEe-spezifischen Annahmen für diesen Zeitraum realisiert. Tabelle 22 zeigt die relativen Verkehrsentwicklungen im nationalen Personenverkehr bis zum Jahr 2030 bzw. bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Basisjahr 2010.

Tabelle 23 zeigt die daraus resultierenden Verkehrsleistungen in GreenLate und den GreenEe-Szenarien. Im Jahr 2030 liegen die nationalen Personenverkehrsleistungen in GreenLate um 13 % höher als in den GreenEe-Szenarien, im Jahr 2050 um 21 %. Der motorisierte Individualverkehr hat in GreenLate im Jahr 2050 einen Anteil von 72 % an den Personenverkehrsleistungen (in den GreenEe-Szenarien 62 %) und ist damit insgesamt um 41 % höher als in den GreenEe-Szenarien.

Tabelle 22: Annahmen Personenverkehrsleistung im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien

	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate
Vermeidung (weniger Wege, kürzere Wege) Verlagerung auf öffentlichen Verkehr sowie Rad- und Fußverkehr	Wie Klimaschutzszenario in (UBA 2016a)	Bis 2030 wie Referenzszenario in (UBA 2016a). Nach 2030 50 % der jährlichen Potenziale aus GreenEe.

	GreenEe1 und GreenEe2		GreenLate	
Entwicklung	2010-2030	2010-2050	2010-2030	2010-2050
ÖV	+39 %	+47 %	+27 %	+29 %
Rad/Fuß	+9 %	+17 %	+0 %	+2 %
MIV	-10 %	-35 %	+10 %	-8 %

Quelle: eigene Analysen, ifeu

Tabelle 23: Nationale Personenverkehrsleistungen in GreenLate und den GreenEe-Szenarien

Mrd. Pkm		MIV	ÖPNV	ÖPFV	Rad/Fuß	Flug national	National Gesamt
2030	GreenEe1+2	812	121	135	73	12	1.153
	GreenLate	992	112	122	77	12	1.306
2050	GreenEe1+2	588	132	139	79	12	950
	GreenLate	832	118	119	68	13	1.152

Quelle: eigene Analysen, ifeu

4.6.2 Entwicklung der Pkw-Flotten

Während in den anderen Green-Szenarien die Zahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen infolge des zurückgehenden Verkehrs ebenfalls sinkt und beispielsweise in den GreenEe-Szenarien bis 2050 auf 2 Mio. Neuzulassungen pro Jahr abnimmt, bleibt in GreenLate die Zahl der jährlichen Neuzulassungen weitgehend konstant bei ca. 3 Mio. Neufahrzeugen.

Auch die Flottenumschichtung zu umweltfreundlicheren Fahrzeugen ist entsprechend der Szenariencharakteristik von GreenLate verzögert. So sind beispielsweise in den GreenEe-Szenarien im Jahr 2030 7,5 Mio. Elektro-Pkw im Bestand. Dagegen werden in GreenLate bis zum Jahr 2030 nur knapp 5 Mio. Elektro-Pkw im Bestand erreicht. Dazu steigt bis 2030 der Neuzulassungsanteil von Elektro-Pkw auf etwa 23 %. Ab dem Jahr 2045 kommen in GreenLate als Neufahrzeuge ausschließlich Elektro-Pkw in die Flotte (in GreenEe-Szenarien bereits ab 2040). Dementsprechend gibt es bei der Einführung der Pkw-Elektromobilität in GreenLate eine zeitliche Verzögerung, aber keine Abschwächung des langfristigen Trends der Elektromobilität insgesamt.

Die Energieeffizienz bei neuen Pkw verbessert sich in den GreenEe-Szenarien innerhalb eines Antriebskonzepts um ca. 1 % pro Jahr. In GreenLate werden bis 2030 nur etwa halb so hohe Minderungsraten, d.h. 0,5 % pro Jahr Effizienzverbesserung angenommen. Im Zeitraum 2030-2050 werden etwa 50 % der dann noch verbleibenden spezifischen Effizienzpotenziale ggü. den GreenEe-Szenarien realisiert.

Tabelle 24: Annahmen Pkw-Flotten im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien

	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate
Pkw-Neuzulassungen	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2050 sinkt die Zahl der Pkw-NZL auf 2 Mio./a 	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2050 weiterhin knapp 3 Mio./a
Elektromobilität im Pkw-Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> 7,5 Mio. E-Pkw bis 2030 im Bestand. Ab 2040 alle Pkw-NZL elektrisch 	<ul style="list-style-type: none"> 5 Mio. E-Pkw bis 2030 im Bestand. Ab 2045 100 % der NZL elektrisch.
Effizienzsteigerung bei Pkw mit Verbrennungsmotor	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung um 1 %/a wie in (UBA 2016a) 	<ul style="list-style-type: none"> Halbierung der jährlichen Effizienzsteigerung ggü. GreenEe-

	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate
		Szenarien auf 0,5 %/a

Quelle: eigene Analysen, TREMOD ifeu

4.6.3 Verlagerung im nationalen Güterverkehr

Die Entwicklung der zukünftigen Güterverkehrsnachfrage in den Green-Szenarien soll die Änderungen der Wirtschaftsentwicklung und Produktionsstrukturen in Deutschland (Güteraufkommen in Produktion, Import und Export) und damit verbundene Änderungen der Transportnachfrage widerspiegeln. Dazu wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, der auf den in URMOD abgeleiteten Rohstoffmengen für die Produktion von Gütern basiert (Methodik siehe Dittrich et al. 2020). Damit wird gewährleistet, dass die Wechselwirkungen zwischen Produktion und Gütertransport abgebildet und die Szenarien in sich konsistent sind. Bei der exogenen Verwendung bspw. des Bundesverkehrswegeplanes (BVWP) ist dies nicht gegeben. Unterschiede bei der nationalen Güterverkehrsnachfrage insgesamt ergeben sich daher primär aus Unterschieden in den Produktionsstrukturen und nicht aus gesonderten Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung.

Verkehrsspezifische Annahmen betreffen dagegen die Verkehrsmittelwahl und somit den Modal-Split der Verkehrsleistungen im Güterverkehr. Im Vergleich zu GreenEe wird hier die Charakteristik von GreenLate deutlich:

- In den GreenEe-Szenarien wurden pro Hauptverkehrsbeziehung (Binnentransport, Empfang, Versand) und Güterabteilung die im Klimaschutzszenario in UBA (2016a) ermittelten Transportmengen (= Güterbeförderungspotenziale) von Bahn und Binnenschiff übernommen. Die Differenz der Bahn- und Binnenschifftransporte zur Gesamttransportnachfrage pro Hauptverkehrsbeziehung und Güterabteilung wird als Lkw-Transporte gerechnet.
- In GreenLate wird hingegen angenommen, dass bis 2030 keine zusätzlichen Beförderungspotenziale für Bahn und Binnenschiff über den allgemeinen Trend hinaus geschaffen werden, die Transportmengen werden daher aus dem Referenzszenario in UBA (2016a) übernommen. Für den anschließenden Zeitraum bis 2050 werden 50 % des jährlichen Wachstumspotenzials für Bahn- und Binnenschifftransport aus den GreenEe-Szenarien angenommen. Wie in allen Green-Szenarien wird der Lkw-Transport als Differenz von Bahn- und Binnenschifftransporten zur Gesamttransportnachfrage bestimmt.

Tabelle 25 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Güterverkehr in GreenLate und GreenEe2. Die Verkehrsleistungen im Straßengüterverkehr sind in GreenLate im Jahr 2050 um 12 % höher als in GreenEe2, dagegen sind die Verkehrsleistungen im Schienentransport um 17 % niedriger, im Binnenschifftransport etwa gleich hoch. Insgesamt sind die Transportleistungen in GreenLate im Jahr 2050 um 2 % höher als in GreenEe2.

Tabelle 25: Nationale Güterverkehrsleistungen im GreenLate gegenüber den GreenEe2

Mrd. tkm		Straße	Schiene	Wasser	National Gesamt
2030	GreenEe2	415	171	71	656
	GreenLate	436	145	69	650

Mrd. tkm		Straße	Schiene	Wasser	National Gesamt
2050	GreenEe2	384	211	74	669
	GreenLate	430	176	73	680

Quelle: eigene Analysen, ifeu

4.6.4 Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr

In den GreenEe-Szenarien wird auch im Güterverkehr eine zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugflotten angenommen. Bei kleinen Lkw-Größenklassen kommen vor allem batterieelektrische Fahrzeuge zum Einsatz, bei Last- und Sattelzügen im Fernverkehr werden zukünftig verstärkt Oberleitungs-Lkw eingesetzt. Alle Lkw, deren Einsatzprofile nicht für vollelektrische bzw. Oberleitungsfahrzeuge geeignet sind, kommen bei Neuzulassungen ab 2040 ausschließlich als Plug-In-Hybrid-Lkw in die Flotte.

Vergleichend dazu hat Elektromobilität im Lkw-Verkehr in GreenLate eine viel geringere Rolle. Bei kleinen Lkw-Größenklassen ist der Markthochlauf von Elektro-Lkw um ca. 10 Jahre gegenüber beispielsweise den GreenEe-Szenarien verzögert. Vor allem aber gibt es bei Last- und Sattelzügen auch bis zum Jahr 2050 keine Oberleitungs-Lkw. Lediglich ein Anteil von etwa einem Drittel Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge wird bis 2050 in den Neuzulassungen erreicht, alle übrigen neuen Lkw sind weiterhin Dieselfahrzeuge (vgl. Tabelle 26).

Auch die Effizienzsteigerungen sind in GreenLate geringer als in den GreenEe-Szenarien:

- In den GreenEe-Szenarien beispielsweise orientieren sich Effizienzverbesserungen an den Annahmen in UBA (2016a): Für neue schwere Sattelzüge mit Dieselantrieb wird bis 2030 eine Effizienzsteigerung um ca. 16 % gegenüber 2010 unterstellt, bis 2050 um 27 %.
- In GreenLate wurden hingegen aktuell abgeleitete Referenzentwicklungen der Energieeffizienz neuer Lkw bis zum Jahr 2030 aus der UBA-Studie „Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen“ UBA (2019c) übernommen. In diesen Referenzentwicklungen sind nur Effizienzverbesserungen mit einer Amortisationszeit von weniger als 3 Jahren einbezogen, jedoch im Unterschied zu UBA (2016a) keine regulatorischen Maßnahmen. Zwischen 2030 und 2050 werden in GreenLate in jeder Lkw-Klasse 50 % der gegenüber den GreenEe-Szenarien noch verbleibenden Effizienzpotenziale realisiert.

Auch im Bahn- und Binnenschifftransport werden zukünftige Effizienzverbesserungen sowie im Schienenverkehr eine Erhöhung des Anteils von Elektrotraktion angenommen. Die hier getroffenen Annahmen sind in GreenLate identisch zu den GreenEe-Szenarien.

Tabelle 26: Annahmen Lkw-Flotten im GreenLate- gegenüber den GreenEe-Szenarien

	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate
Elektromobilität kleine Lkw	<ul style="list-style-type: none"> Ab 2040 nur E-Lkw-NZL: <12t 75 % BEV, >12t nur PHEV/OH 	<ul style="list-style-type: none"> E-Markthochlauf um ca. 10 Jahre ggü. GreenEe verzögert. Erst im Jahr 2050 100 % Elektro-Lkw bei den Neuzulassungen
OH-Lkw	OH-Neuzulassungsanteile ab 2025 <ul style="list-style-type: none"> 2030: 8 % 2040: 80 % 2050: 90 % Ab 2040 Rest PHEV.	Keine OH-Lkw. PHEV-NZL-Anteile: <ul style="list-style-type: none"> 2030: 0 % 2040: 13 % 2050: 33 %
Effizienzsteigerung Diesel-Lkw	<ul style="list-style-type: none"> 2010-2030: 0,8 %/a 	<ul style="list-style-type: none"> 2010-2030: 0,5 %/a

	GreenEe1 und GreenEe2	GreenLate
Effizienzsteigerung und alternative Antriebe bei Bahn und Binnenschiff	<ul style="list-style-type: none"> • 2030-2050: 0,6 %/a Wie in UBA (2016a) Wie in UBA (2016a) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bis 2030 Referenzszenario aus UBA (2019d). • Bis 2050 50 % des GreenEe-Potenzials

Quelle: eigene Analysen, TREMOD ifeu

4.6.5 Internationaler Verkehr

Im internationalen Flugverkehr werden ähnlich wie im nationalen Personenverkehr die Verkehrsentwicklungen in GreenLate bis 2030 an das Referenzszenario in UBA (2016a) angelehnt. Bis 2050 werden 50 % des jährlichen Reduktionspotenzials gegenüber den GreenEe-Szenarien unterstellt. Damit sind die Verkehrsleistungen in GreenLate 2030 um 5 % und 2050 um 8 % höher als in den GreenEe-Szenarien. Gleichzeitig fallen zukünftige Effizienzverbesserungen im Flugverkehr in GreenLate deutlich schwächer aus als in allen anderen Green-Szenarien. Während die spezifischen Energieverbräuche pro Personen-km in den GreenEe-Szenarien beispielsweise im Zeitraum 2010-2050 um 56 % (ca. 2 %/a) abnehmen (gemäß Klimaschutzszenario KS95 in (Öko-Institut e.V. / Fraunhofer ISI 2015)), sind es in GreenLate im gleichen Zeitraum nur 36 % (ca. 1 %/a, vergleichbar zum AMS in der gleichen Studie).

Im internationalen Seetransport resultieren die Transportleistungsentwicklungen direkt aus den zeitlichen Entwicklungen der Transportmengen im Empfang und Versand in deutschen Häfen, differenziert nach Güterabteilungen (NST2007) sowie Start-/Zielregionen. Die Methodik ist in allen Green-Szenarien einheitlich, es gibt keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung. Die Energieeffizienz von Seeschiffen verbessert sich in den GreenEe-Szenarien angelehnt an UBA (2016b) zwischen 2010 und 2050 um ca. 53 %. In GreenLate wird im gleichen Zeitraum nur eine Effizienzverbesserung um 40 % erreicht. Diese Annahme orientiert sich am unteren Ende der Bandbreite technischer Potenziale von 40-60 %, die in der Third IMO Greenhouse Gas Study (IMO 2014) ermittelt worden ist.

4.7 Weitere Sektoren

4.7.1 Tiefbau

Im Folgenden werden ausschließlich die Annahmen im Tiefbau beschrieben, die in GreenLate anders als in den GreenEe-Szenarien (siehe Dittrich et al. 2020) angenommen werden.

4.7.2 Stromleitungen

An dieser Stelle muss auf ein Ergebnis vorgegriffen werden, dass im Bericht im Kapitel 5 als Ergebnis beschrieben wird, das aber in der Modellierung der Rohstoffannahmen ein Zwischenergebnis ist. Die in GreenLate ermittelten Strommengen übersteigen die von allen Green-Szenarien deutlich. Daher wurde angenommen, dass die Hoch-, Höchst- und Mittelspannungsleitungslängen um 10 % höher als in allen Green-Szenarien ausfallen (für die Szenarien GreenEe, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wurden dagegen aufgrund vergleichbarer Stromverbrauchshöhe keine Unterscheidung getroffen). Der Anstieg wurde anteilig auf Erdkabel und Freileitungen aufgeteilt: 95 % Freileitung versus 5 % Erdkabel bei Hoch- und Höchstspannung, und 25 % Freileitung versus 75 % Erdkabel bei Mittelspannung. Die Materialkennndaten von Wiesen et al. (2016) werden wie bei den anderen Green-Szenarien angewendet. Oberleitungen für Oberleitungs-LKWs entfallen in diesem Szenario.

4.7.3 Straßenbau

In GreenLate wird zur Modellierung der Rohstoffaufwendungen der überregionalen Straßen sowie der Ingenieursbauwerke auf das Referenz-Szenario von Knappe et al. (2015) zurückgegriffen. Bitumen wird bis 2050 vollständig durch Lignin substituiert, da Bitumen nicht mehr produziert wird. Der lokale Wegebau (kommunale Straßen sowie Kreisstraßen einschließlich Tunnel und Brücken) wird wie bei allen Green-Szenarien entlang der angenommenen Siedlungsentwicklung (Kap. 4.2) angepasst.

4.8 Energieversorgung

4.8.1 Festlegung verschiedener Parameter

Die grundsätzlichen Maßnahmen und Stellschrauben im Bereich der Energieversorgung in GreenLate sind im Folgenden den GreenEe-Szenarien gegenübergestellt. Die technischen Parameter sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020) einheitlich für alle Szenarien dargestellt. Der Stromaustausch in Europa wurde in allen Szenarien einheitlich mit einem bilanziellen Jahressaldo von „Null“ für den deutschen Im- und Export abgebildet.

Tabelle 27: Annahmenüberblick zur Energieversorgung in GreenLate im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe1 und 2	GreenLate
Kohlekraftwerke Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> Braunkohle 30 Jahre Steinkohle 40 Jahre Ab 2040 keine Kohle 	
Merit-Order fossile Kraftwerke	<ul style="list-style-type: none"> 2030 Kohle vor Gas (niedrigerer CO₂-Preis im ETS) 2040 keine Beeinflussung der Merit-Order (fuel switch) 	
EE-Potentiale & Markthochlauf	<ul style="list-style-type: none"> Mindestleistung Offshore 2050 32 GW 2050 freier Zubau von Wind onshore und PV daraus abgeleitet für 2030 und 2040 Korridor mit 0 % Überbauung⁵ 	<ul style="list-style-type: none"> Aufgrund eines sehr hohem EE-Ausbedarfs 2050 und niedrigeren Klimaziele 2030 → Restriktionen im Markthochlauf → 15 % Überbauung
Lebensdauer Wind und Überbauung der langfristigen Repoweringrate	<ul style="list-style-type: none"> 20 Jahre Keine Überbauung mit 30 %/a Marktwachstum 	
Lebensdauer PV und Überbauung der langfristigen Repoweringrate	<ul style="list-style-type: none"> 25 Jahre Keine Überbauung mit 50 %/a Marktwachstum 	<ul style="list-style-type: none"> 25 Jahre 15 % Überbauung
PtG/L-Importe	<ul style="list-style-type: none"> 15 % Überbauung Preis: 2030: 154,3 €/MWh, 2040: 136,2 €/MWh, 2050: 118,2 €/MWh Preise identisch für alle Szenarien 	<ul style="list-style-type: none"> 50 % Überbauung Kein PtG/L-Importe 2030/2040 auf nationales Klimaziel (wie GreenEe)

⁵ Überbauung ist die Erhöhung der jährlichen Installationsrate im Zeitraum Heute → 2050 gegenüber der langfristigen notwendigen Repowering-Rate (installierte Leistung in 2050 geteilt durch Lebensdauer). Wenn eine Überbauung akzeptiert wird, bedeutet dies auch in gewissen Umfang volkswirtschaftliche Verwerfungen durch den Rückgang von Industriezweigen nach 2050 (Produktionsanlagen, Installateure, Schiffe, Kräne, ...).

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe1 und 2	GreenLate
	<ul style="list-style-type: none"> PtG/L-Importe 2030 und 2040 ergeben sich aus dem Markthochlauf für 2050 und werden nur im internationalen Verkehr und stofflich genutzt (nicht für Kyoto-Klimaziel 2030/2040 relevant) 	
Technologie Wind/PV	<ul style="list-style-type: none"> Basisannahmen Auswahl zwischen Schwachwind-Anlagen und Starkwindszenarien → Schwachwindanlagen mit geringer Leistung pro Anlage Langfristig 50 %/50 % Dach- zu Freifläche 	

Quelle: eigene Analysen, IEE

4.8.2 Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik

Auf Basis des Ergebnisses für 2050 werden Ausbaukorridore in Form von Ober- und Untergrenze (so früh wie möglich / so spät wie möglich) für den Markthochlauf von für Wind-Onshore und Photovoltaik vorgegeben. Der Markthochlauf für PV weist aufgrund der Langlebigkeit der Module ohne eine Überbauung (maximaler jährlicher Absatzmarkt vor 2050 gegenüber der langfristigen Repoweringrate nach 2050) relativ geringe Freiheitsgrade auf. In GreenLate stößt der PV-Markthochlauf aufgrund der langfristig notwendigen höheren absoluten installierten Leistungen an technische Grenzen. Aus diesem Grund wird eine Überbauungsrate von 15 % notwendig. Die Ausprägung in 2030 und 2040 im Ausbaukorridor wird durch das THG-Emissionsziel bestimmt und weist dabei nicht nur bei Wind-Onshore sondern auch bei PV große Freiheitsgrade auf. In GreenLate sind dieselben Technologien der Photovoltaik und Windenergieanlagen wie in den GreenEe-Szenarien unterstellt, sie werden in Dittrich et al. (2020) ausführlich beschrieben.

4.8.3 Markthochlauf von PtG/L und Zuordnung auf Anwendungsbereiche

Auf Basis des Ergebnisses für 2050 wird eine Untergrenze (so spät wie möglich) des Markthochlaufs für PtG/L-Importe festgelegt. Da langfristig eine große Nachfrage an Importen im GreenLate-Szenario notwendig wird, um Treibhausgasneutralität zu erreichen, stellt der dafür notwendige absolute Markthochlauf eine besondere Herausforderung dar. Im Sinne eines verzögerten Szenarios muss das relative Wachstum geringer ausfallen, und selbst dann ist das absolute notwendige Wachstum immer noch sehr hoch. Möglich wird dies durch eine zeitweise starke Überbauung der jährlichen Import-Infrastruktur um 50 % (maximaler jährlicher Absatzmarkt vor 2050 gegenüber der langfristigen Repoweringrate nach 2050). In den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme GreenSupreme) liegt diese Überbauungsrate bei nur 15 %.

Die Importe in 2030 und 2040 werden wie in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme GreenSupreme) dabei nicht in den Anwendungen, die dem nationalen THG-Emissionsziel bilanziell unterliegen, sondern im internationalen Verkehr und nichtenergetischen in der industriellen Produktion (Chemie) genutzt.

4.8.4 Herkömmlicher Stromverbrauch

Die Entwicklung des klassischen Stromverbrauchs ohne neue Sektorkopplungs-Anwendungen ist in folgender Tabelle für GreenLate absolute und relativ im Vergleich zu GreenEe1 dargestellt. Grundsätzlich ist der Verbrauch mit teilweise bis zu 40 % deutlich höher als in GreenEe1. Nur im Bereich des Schienenverkehrs ist der Stromverbrauch geringer. Absolut werden 2050 97,4 TWh mehr Strom verbraucht.

Tabelle 28: Klassischer Stromverbrauch GreenLate im Vergleich zu GreenEe1

TWh/a		2030	2040	2050	2030 relativ zu GreenEe1	2040 relativ zu GreenEe1	2050 relativ zu GreenEe1
Industrie	Prozesswärme- monovalent	47,7	82,9	136,0	72,8 %	114,9 %	140,4 %
	Klimakälte	4,2	2,9	0,0	130,0 %	135,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	4,2	2,9	1,4	130,0 %	135,0 %	130,7 %
	Mechanische Energie	79,1	71,1	63,5	109,6 %	115,4 %	120,0 %
	IKT	12,1	12,6	12,2	130,0 %	135,0 %	130,7 %
	Beleuchtung	11,2	9,4	7,1	130,0 %	135,0 %	130,7 %
GHD	Prozesswärme- monovalent	8,7	8,7	8,7	105,0 %	105,0 %	105,0 %
	Klimakälte	6,9	10,3	13,1	130,0 %	135,0 %	130,7 %
	sonst. Prozesskälte	18,7	21,9	23,6	130 %	135 %	130,7 %
	Mechanische Energie	32,6	26,2	19,0	109,6 %	115,4 %	120 %
	IKT	30,4	30,6	28,6	130 %	135 %	130,7 %
	Beleuchtung	53,9	40,3	23,9	130 %	135 %	130,7 %
Haushalte	Mechanische Energie	5,6	5,4	4,7	130 %	135 %	130,7 %
	Beleuchtung	10,3	6,6	2,4	130 %	135,0 %	130,7 %
	PW, Kälte, IKT	106,2	98,0	83,0	130 %	135,0 %	130,7 %
Gebäudewärme NSH/TWW		16,0	6,4	3,2	116,8 %	95,2 %	89,6 %
Verkehr - Schiene		11,8	12,3	12,8	84,7 %	84,3 %	83,9 %
Umwandlungsverbrauch		7,0	5,0	4,0	100 %	125,0 %	133,3 %
Leitungsverluste		28,0	30,7	33,0	100 %	100 %	100 %

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

4.8.5 Biomassenutzung

Die detaillierte Herleitung der Szenarioannahmen der Biomassenutzung sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020) dargestellt. 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, um 18 % höher wie in GreenEe1.

Tabelle 29: Stromerzeugung in GreenLate im Vergleich zu GreenEe1

TWh		Strom aus Biogas	Davon Strom aus Gülle	Davon Strom aus NaWaRo	Davon Strom aus Klärgas	Davon Strom aus Abfall
2030	GreenEe1	9,70	5,80	2,70	0,76	0,44
	GreenLate	10,49	6,59	2,70	0,76	0,44
2040	GreenEe1	8,39	7,25	0,00	0,80	0,33
	GreenLate	9,56	8,42	0,00	0,80	0,33
2050	GreenEe1	8,21	6,93	0,00	0,90	0,38
	GreenLate	9,45	8,17	0,00	0,90	0,38

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

Neben dem Gülleaufkommen unterscheiden sich die Szenarien im Bereich der festen Biomasse je nachdem wie schnell im Gebäudebereich der Ausstieg aus den dezentralen Holzheizungen erfolgt (Modellergebnis GEMOD) und inwiefern in der Industrie Biomasse-Heizkesseln in der Prozesswärmeerzeugung neben fossilen Bestands-KWK-Anlagen und Elektrodenkesseln zum Einsatz kommen (Modellergebnis SCOPE). 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.

Tabelle 30: Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industriellen Reststoffen) in GreenLate im Vergleich zu GreenEe1

TWh		Strom aus Biogas	Wärme in Industrie	Wärme in HH und GHD	BtL	BTL-Verwendung	
						Verkehr	ch. Industrie
2030	GreenEe1	9,70	55,21	9,89	15,90	15,90	
	GreenLate	10,49	52,34	12,76			
2040	GreenEe1	8,39	51,76	0,84	16,80	8,40	8,40
	GreenLate	9,56	51,12	1,48			
2050	GreenEe1	8,21	47,10	0,00	17,68		17,68
	GreenLate	9,45	40,40	0,00			

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

Im Bereich der Biomethan-Gasnetzeinspeisung gibt es keine Unterschiede zwischen den GreenEe-Szenarien.

Tabelle 31: Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien

TWh		Biomethan aus Biogas	Davon Abfall	Davon NaWaRo	Davon Klärgas	Davon Gülle
2030	Green-Szenarien	6,95	3,43	1,00	2,52	0,00
2040	Green-Szenarien	5,36	2,68	0,00	2,68	0,00
2050	Green-Szenarien	5,94	2,94	0,00	3,00	0,00

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

4.8.6 Sonstige Rest- und Abfallströme

Das Müllaufkommen und damit die Strom- und Wärmeerzeugung wurde mit Hilfe eines Korrekturfaktors zur Produktionseffizienz (Verschlechterung 1,04 in 2030 bis 1,08 in 2050) gegenüber GreenEe abgeleitet. Die Szenarioannahmen sind GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020) dargestellt. In Summe ergibt sich eine etwas höhere Strom- und Wärmeerzeugung, aber auch etwas höhere THG-Emissionen. Die THG-Emissionen in 2050 sind per Definition durch die unterstellte vollständige Versorgung des nichtenergetischen Verbrauchs mit PtL einheitlich auf „Null“ gesetzt.

Tabelle 32: Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenLate im Vergleich mit GreenEe

	2030		2040		2050	
	GreenEe1/2	GreenLate	GreenEe1/2	GreenLate	GreenEe1/2	GreenLate
Stromerzeugung (netto) [TWh _{el}]	5,3	5,52	4,4	4,67	3,6	3,90
Wärmeerzeugung (Fernwärme) [TWh _{th}]	5,83	6,07	5,00	5,31	4,17	4,52
Emissionen [Mio. t CO ₂ Äq.]	17,4	18,12	13,6	14,45	0	0

Quelle: eigene Annahmen UBA, ifeu

5 Ergebnisse

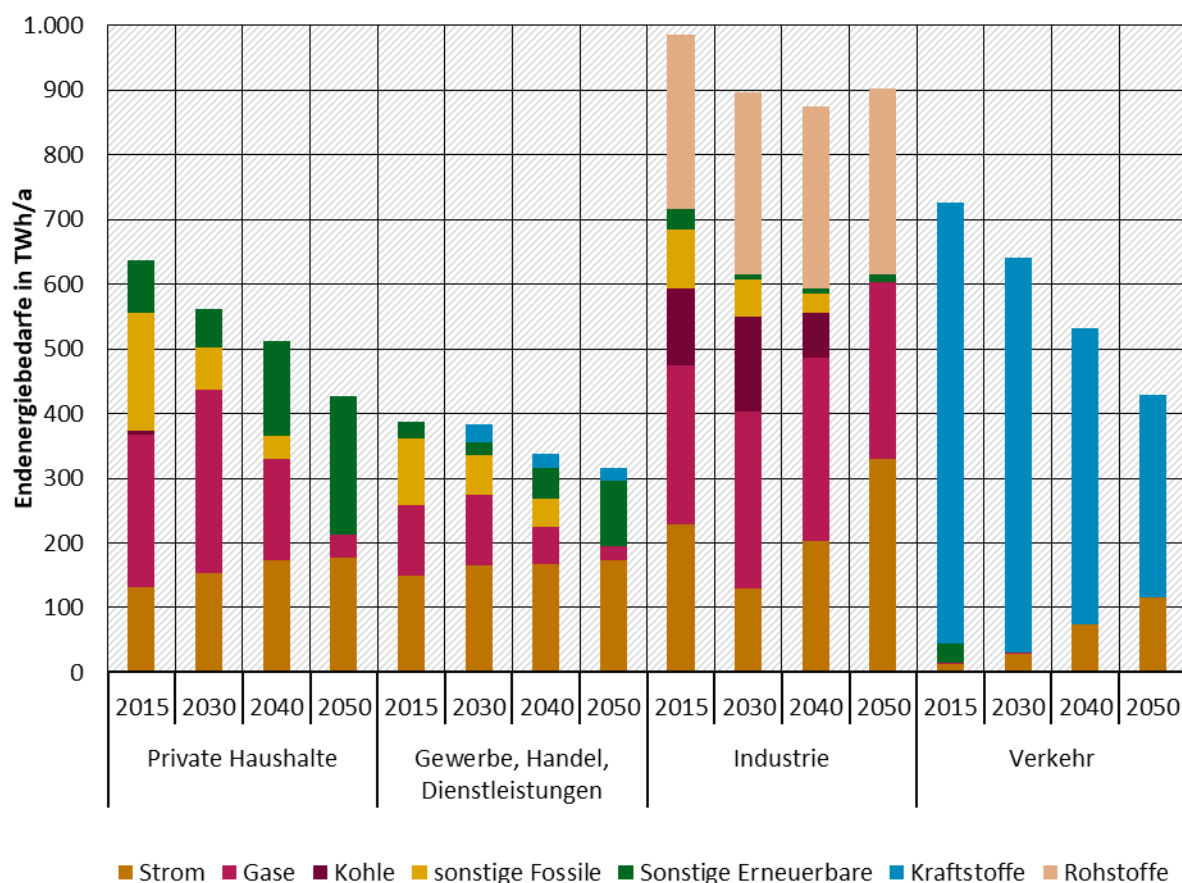
5.1 Energie

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse der Gesamtsystemoptimierung mittels SCOPE und des Verkehrsbereichs mittels TREMOD dargestellt. Dabei wird GreenLate aufgrund der vergleichbaren Annahme zu einer nicht-ausgeglichen Handelsbilanz zusätzlich mit GreenEe1 verglichen.

5.1.1 Endenergiebedarfe

Die Entwicklung der Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträgern und Sektoren ist in Abbildung 9 dargestellt. Dabei wird in allen Bereichen eine beachtliche und kontinuierliche wenn auch im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien geringere Effizienzsteigerung erreicht. Nur im Bereich Industrie wird deutlich, dass die hohen Produktionsmengen in Verbindung mit den geringeren technologischen Entwicklungen zu geringen Endenergieeinsparungen führen.

Abbildung 9: Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien wird dabei die geringe Effizienz und damit der höhere Endenergiebedarf insbesondere langfristig im Bereich synthetische Gase (PtG) und Kraftstoffe (PtL) deutlich. Dies trifft sowohl insgesamt in allen Stützjahren als auch in den einzelnen Sektoren zu. So wird 29 % mehr Endenergie benötigt als in GreenEe1. Der Endenergiebedarf sinkt auf nur 2071 TWh in 2050. Der PtG/PtL-Bedarf liegt 63 % über den im

GreenEe1-Szanrio. Im Bereich Industrie erfolgt die geringste sektorale Reduktion des Energiebedarfs in GreenLate, dieser sinkt von 2015 um nur 8 % bis 2050 auf 902 TWh.

Tabelle 33: Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenLate im Vergleich zur Summe in GreenEe1

TWh/a		Strom	Gas	Kohle	sonstige Fossile	sonstige Erneuerbare	Kraftstoffe	Rohstoffe	Summe
2015	HH	132	235	7	182	81	0	0	637
	GHD	149	110	0	102	27	0	0	388
	Industrie	228	247	119	90	32	0	269	985
	Verkehr	12	2	0	0	30	683	0	727
	SUMME	521	594	126	374	170	683	269	2.737
2030 GreenLate	HH	154	283	0	66	58	0	0	561
	GHD	166	109	0	61	20	27	0	383
	Industrie	131	274	145	58	8	0	282	897
	Verkehr	29	1	0	0	0	612	0	642
	SUMME	480	666	145	185	87	639	282	2.483
GreenEe1	SUMME	490	565	132	157	112	526	282	2.263
2040 GreenLate	HH	173	156	0	36	148	0	0	513
	GHD	168	58	0	43	47	23	0	338
	Industrie	202	283	70	31	7	0	282	875
	Verkehr	73	0	0	0	0	458	0	532
	SUMME	616	498	70	110	202	481	282	2.259
GreenEe1	SUMME	606	339	62	78	185	328	282	1.879
2050 GreenLate	HH	178	35	0	0	214	0	0	426
	GHD	173	21	0	0	103	19	0	315
	Industrie	329	273	0	0	12	0	287	902
	Verkehr	116	0	0	0	0	312	0	428
	SUMME	796	329	0	0	328	330	287	2.071
GreenEe1	SUMME	671	169	0	0	279	202	288	1.609

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

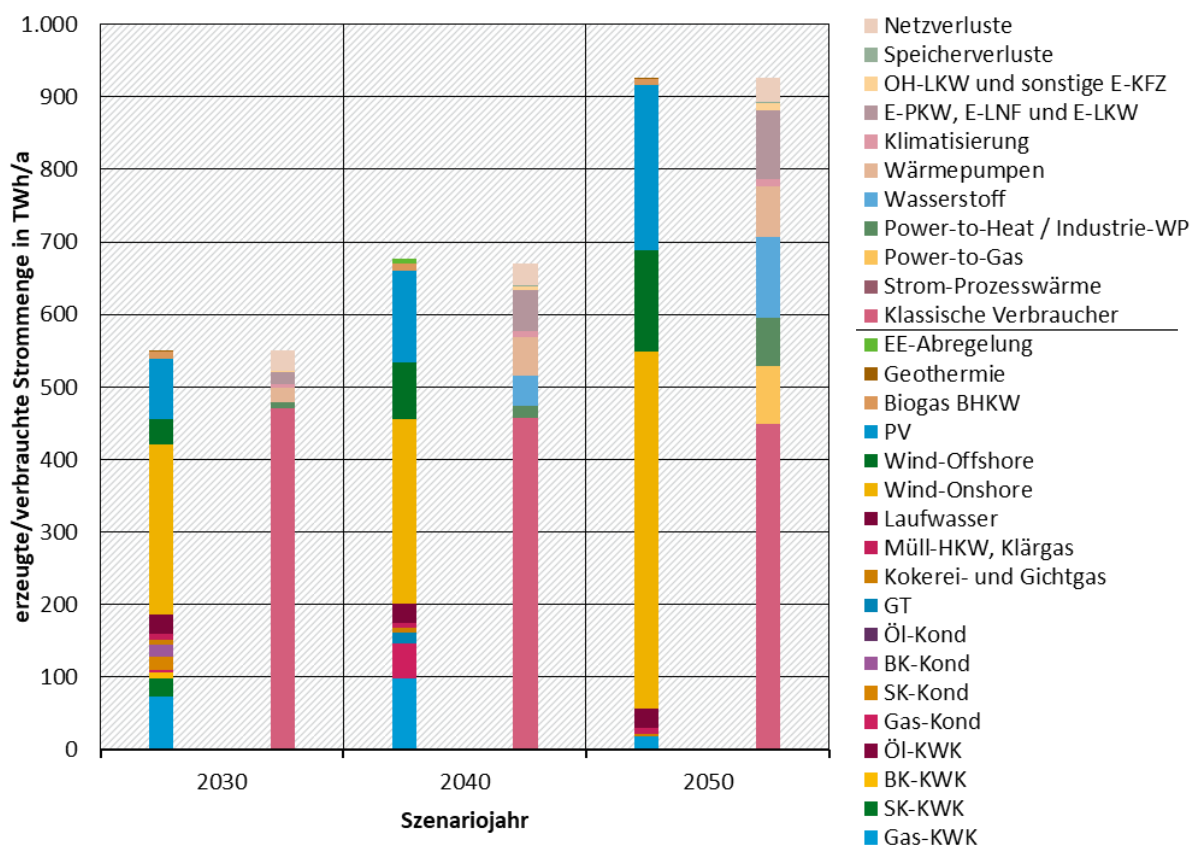
5.1.2 Stromsektor

5.1.2.1 Strombilanz in Deutschland

In Abbildung 10 sowie Tabelle 34 und Tabelle 35 ist die Nettostromerzeugung und der Nettostromverbrauch zzgl. Verluste in seiner Entwicklung dargestellt. Dabei ist eine zusätzliche

Randbedingung der europäischen stündlichen Energiesystemoptimierung, dass die Stromimport- und Exporte für Deutschland in der Jahressumme ausgeglichen sind.

Abbildung 10: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Sektorkopplung steigt der Stromverbrauch auf in Summe 927 TWh. Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien ergibt sich in GreenLate vor dem Hintergrund der Szenariencharakteristik der höchste Bedarf. So werden beispielsweise 135 TWh mehr als in GreenEe1 benötigt. Die herkömmlichen, also heutigen, Stromverbraucher, sinken vor dem Hintergrund der Effizienzsteigerung. Dies geschieht jedoch im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien im geringsten Ausmaß. Der größte neue Verbraucher stellen Wasserstoffelektrolyseanlagen für die industrielle Produktion dar. Insgesamt werden hier in 2050 knapp 110 TWh benötigt. Dennoch besteht in Deutschland das Potential eine geringe Menge von 47 TWh PtG Methan zu erzeugen, wofür 78 TWh Strom benötigt wird. Dies deckt jedoch nur einen marginalen Anteil der in GreenLate erhöhten PtG/PtL-Nachfrage. In GreenLate wird diese nicht durch eine höhere nationale Erzeugung gedeckt, sondern durch Importe.

Tabelle 34: Nettostromverbrauch zzgl. Verluste in GreenLate und in GreenEe1

TWh/a		herk. Verbrauch	PtG	PtH	H2	WP	Klima	E-Mob	OH-Lkw u.a.	Speicherverlust	Netzverlust
2030	GreenLate	469,9	0,0	9,7	0,0	19,8	4,8	15,7	1,8	0,3	28,0
	Green-Ee1	417,9	0,0	10,6	22,6	26,1	4,9	23,6	3,9	0,2	28,0
2040	GreenLate	456,6	0,0	17,7	41,7	53,4	7,5	56,5	4,6	2,4	30,7
	Green-Ee1	373,3	0,0	20,9	82,9	44,4	7,3	59,4	21,1	2,2	30,7

TWh/a		herk. Verbrauch	PtG	PtH	H2	WP	Klima	E- Mob	OH- Lkw u.a.	Speic herver- lust	Netzv erlust
2050	GreenLate	449,9	78,4	66,8	112,1	70,2	9,7	95,0	8,4	2,8	33,0
	Green-Ee1	353,1	90,0	37,2	109,8	54,5	9,8	71,4	31,1	1,9	33,0

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Photovoltaik und Windenergie onshore leisten mit 718 TWh etwa 78 % der Stromerzeugung in 2050. Es werden in GreenLate deutlich mehr Onshore- und PV-Anlagen national benötigt als in GreenEe1 (+121 TWh in 2050). Und Gas nimmt in der Stromversorgung aufgrund des verzögerten Ausbaus der erneuerbaren Energien eine stärkere Rolle als Brückentechnologie in der Stromerzeugung ein als in GreenEe1 (+127 TWh in 2040).

Tabelle 35: Nettostromerzeugung in GreenLate und in GreenEe1

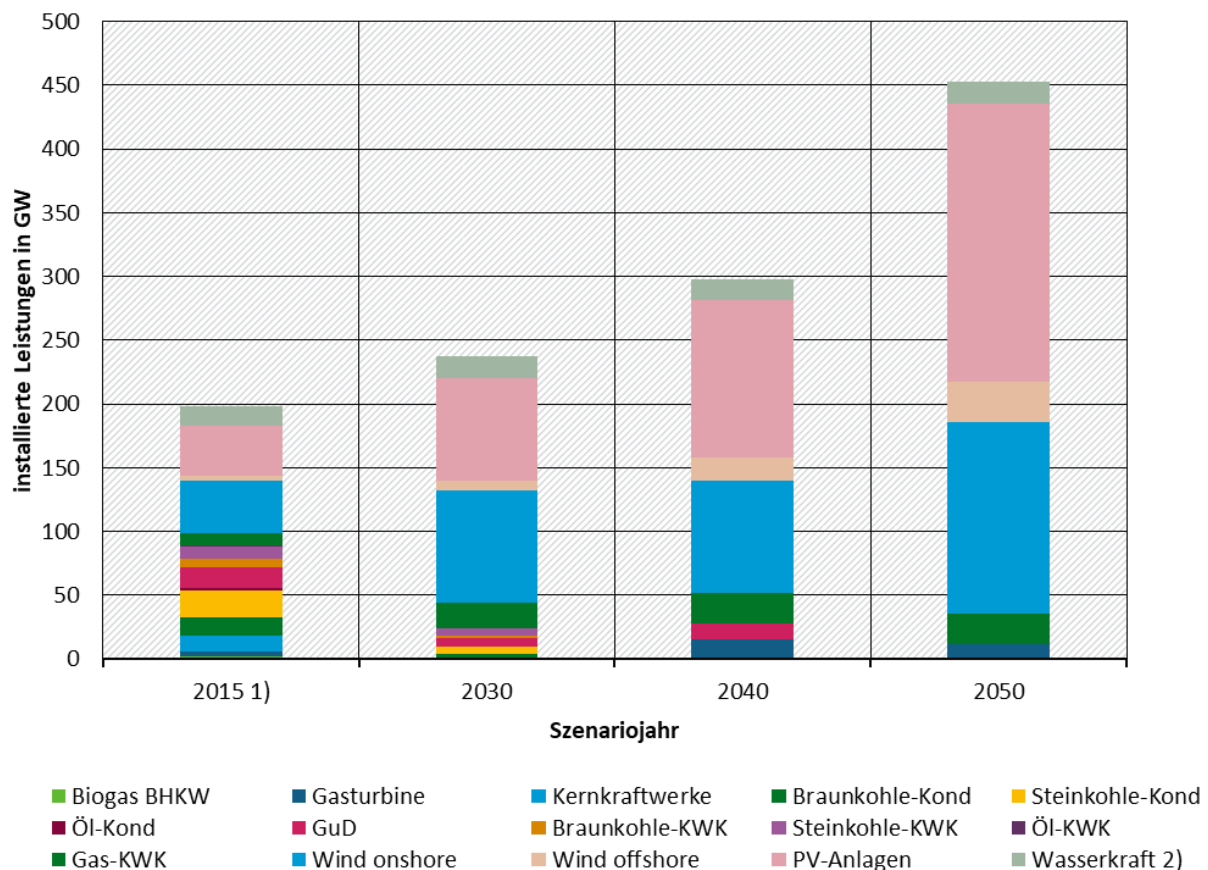
TWh/a		Wasser	Bio	Geothermie	Müll, Klärg.	Gas	Braunkohle	Steinkohle	Onshore	Offshore	PV	SUMME	EE-Abregel
2030	GreenLate	26,0	10,5	0,6	8,5	82,7	25,3	44,0	234,4	34,4	83,0	549,4	0,0
	Green-Ee1	25,9	9,7	0,6	8,3	63,0	26,1	41,9	200,0	71,3	90,9	537,7	0,0
2040	GreenLate	26,5	9,6	0,9	7,8	167,5	0,0	0,0	254,3	78,6	125,8	671,1	5,6
	Green-Ee1	26,6	8,4	0,9	7,5	44,9	0,0	0,0	327,0	103,8	122,8	642,0	0,0
2050	GreenLate	26,9	9,4	1,3	6,9	22,4	0,0	0,0	493,1	139,7	226,6	926,5	0,0
	Green-Ee1	26,9	8,2	1,3	6,9	12,0	0,0	0,0	415,7	139,7	181,0	791,7	6,4

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

5.1.2.2 Installierte Leistungen in Deutschland

In Abbildung 11 ist die für die Deckung des nationalen Stromverbrauchs notwendige installierte Leistung an Stromerzeugern dargestellt. In Tabelle 37 ist neben dem Vergleich zu GreenEe1 zusätzlich der mit der EE-Erzeugung eng verbundene Ausbau an neuen Batteriespeichern und PtG/PtL-Anlagen dargestellt.

Abbildung 11: Installierte Leistungen Deutschland in GreenLate

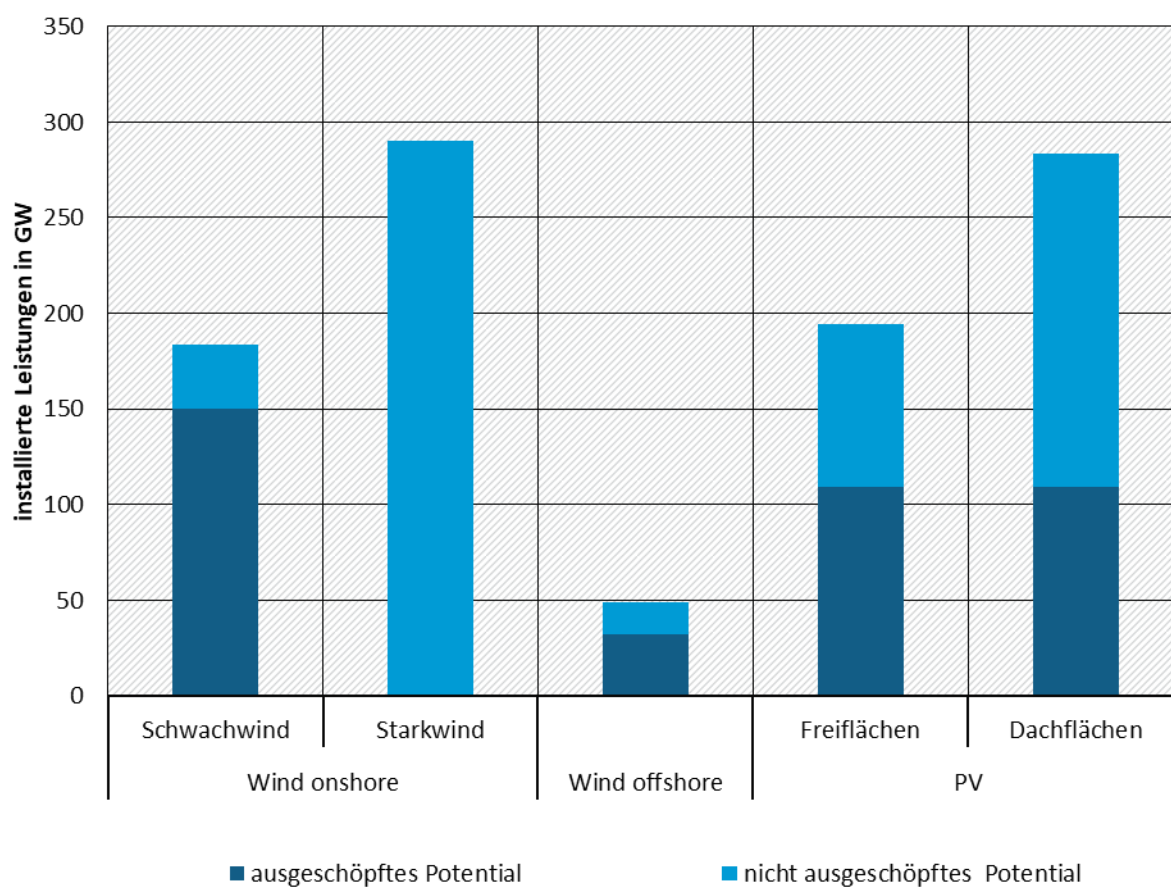


1) historische Werte basierend auf eigenen Auswertungen der Kraftwerkslisten der BNetzA und des UBA; 2) Zuordnung von Wasserkraftanlagen nach Teilnahme am deutschen Markt, Standort teilweise im Ausland

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Dabei stellt der Zubau von Wind und PV das Ergebnis einer anteiligen Flächenpotenzialausschöpfung dar, wie in Abbildung 12 zu sehen ist. In GreenLate wird das vorab festgelegte Potential für erneuerbare Energien im Vergleich der Green-Szenarien am weitesten genutzt, jedoch auch nicht ausgeschöpft. Wie auch in den anderen Green-Szenarien werden 2050 ausschließlich Schwachwind Anlagen installiert und dabei etwa 82 % des vorab festgelegten Potentials ausgenutzt. Das Verhältnis der Dach- zu Freiflächen-PV-Anlagen ist dabei exogen vorgeben und stellt kein Ergebnis der Modellierung dar. Für Wind-Offshore wird die vorgegebene Mindestleistung von rund 32 GW ausgebaut.

Abbildung 12: Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050 in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Für die Ausbaupfade werden wie in Kapitel 4.8.2 beschrieben Ausbaukorridore ausgehend vom Zielwert 2050 vorgegeben. Der mit Hilfe des Modells ermittelte Markthochlauf für Wind-Onshore und PV befindet sich in 2030 aufgrund der engeren CO₂-Vorgaben über der Untergrenze des für 2050 notwendigen Wertes. In 2040 dagegen lässt das THG-Ziel ausreichende Spielräume, so dass nur die Untergrenze ausgebaut wird

Tabelle 36: Markthochlauf Wind-Onshore und PV

GW	Wind Onshore			PV		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Korridor-Obergrenze	123,7	150,5		151,6	214,2	
Korridor-Untergrenze	55,8	87,6		60,9	123,5	
Ergebnis	87,6	87,6	150,5	81,2	123,5	218,1

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Die installierten Leistungen sind in Tabelle 37 zu sehen. Im Vergleich zu GreenEe1 wird deutlich, dass es langfristig insbesondere mehr Wind-Onshore (+22 GW) und mehr PV (+45 GW) braucht, um die deutlich höhere nationale direkte Stromnachfrage decken zu können.

Tabelle 37: Installierte Leistungen in GreenLate und in GreenEe1

GW		Bi o	Ga s	Kernkr aft	Braunk ohle	Steinko hle	Öl	Onsh ore	Offsh ore	PV	Pt G	BattSpei cher	Was ser
2015		2,4	29,9	12,1	21,1	30,9	2,6	41,2	3,3	39,8	0,0	0,0	14,9
2030	GreenLate	0,1	27,5	0,0	5,2	11,3	0,2	87,6	7,5	81,2	0,0	0,0	16,7
	GreenEe1	0,1	24,3	0,0	5,2	11,3	0,2	83,4	15,6	88,9	0,0	0,0	16,7
2040	GreenLate	0,1	51,9	0,0	0,0	0,0	0,1	87,6	18,0	123,5	0,0	0,0	16,7
	GreenEe1	0,1	25,4	0,0	0,0	0,0	0,1	109,2	23,8	120,6	0,0	0,0	16,7
2050	GreenLate	0,1	35,2	0,0	0,0	0,0	0,0	150,5	31,9	218,1	22,9	5,9	16,8
	GreenEe1	0,1	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	128,4	31,9	173,4	24,3	0,7	16,8

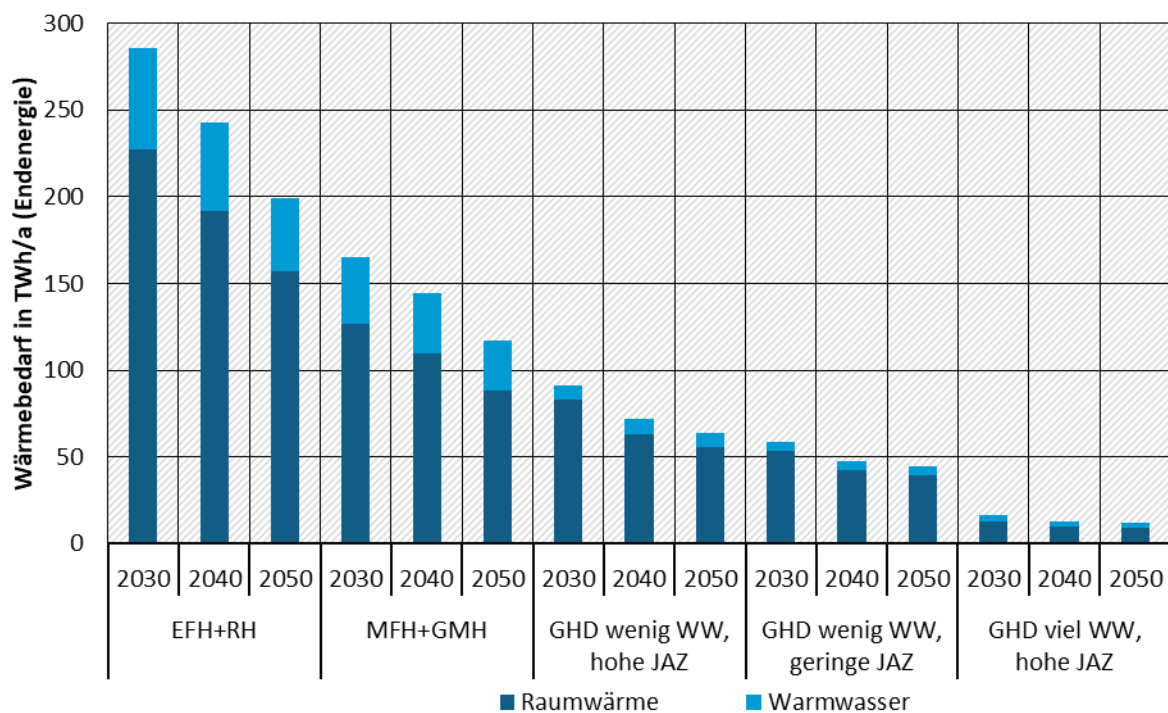
Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

5.1.3 Wärmesektor

5.1.3.1 Gebäudewärme Haushalte und GHD

Auf Basis der Zwischenergebnisse zu der Gebäudewärmebedarfsentwicklung und den EE-Wärmepotenzialen in Kapitel 4.5 werden im Folgenden die Ergebnisse der Gesamtsystem-Optimierungsrechnung und damit die Rückkopplung der THG-Emissions-Ziele auf die Investitionsentscheidungen in der Wärmeversorgung dargestellt. Die Entwicklung der Gebäudewärmebedarfe für Haushalte und GHD ist noch einmal in Abbildung 13 zusammengefasst.

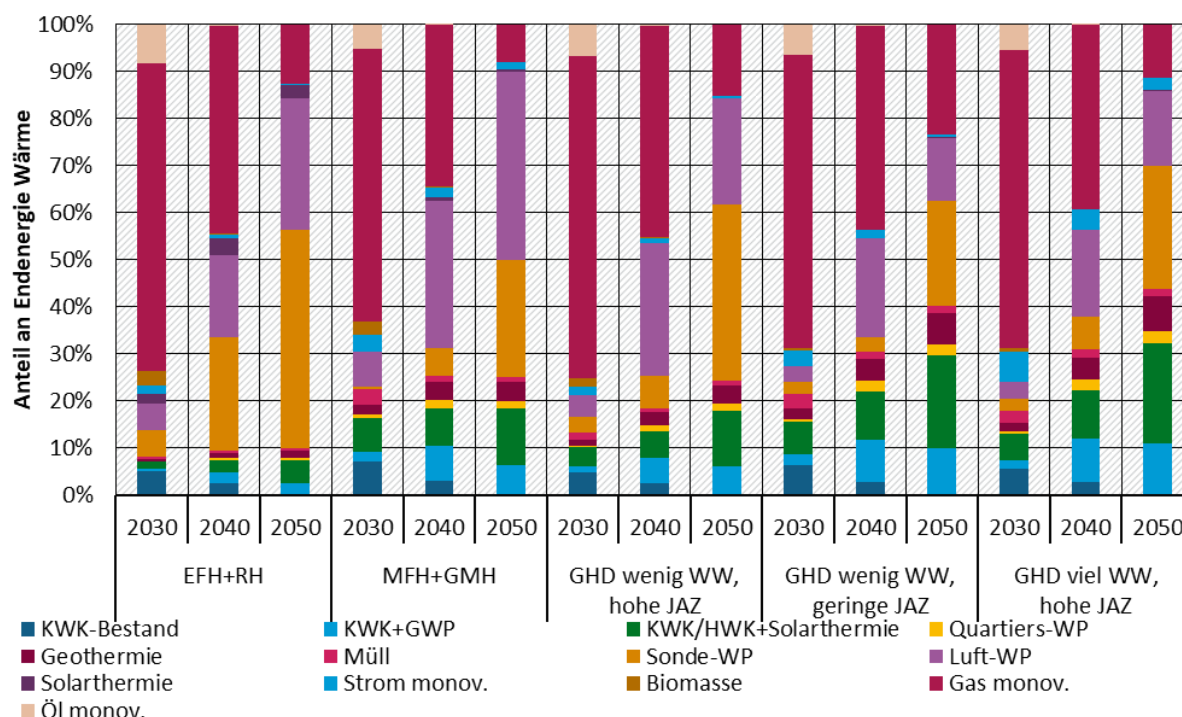
Abbildung 13: Entwicklung der Wärmenachfrage in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Die relative Deckung dieser Wärmenachfrage ist in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 14: Deckung der Wärmenachfrage in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

In allen Green-Szenarien außer GreenLate kommt die Technikkombination moderner KWK-Solarthermienetze im Rahmen der kostenoptimierten Wärmeversorgung langfristig nur durch das Wechselspiel mit dem Stromsystem mit langfristig hohen Deckungsanteilen von PtH (Elektrodenkesseln) zum Einsatz. In GreenLate hingegen wird diese Technikkombination vor dem Hintergrund höherer Wärmebedarfe auch für die reine Wärmeversorgung benötigt, da andere EE-Wärmepotenziale begrenzt sind. Sie trägt mit 9,8 % den größten Beitrag zur Wärmenetzversorgung bei. Moderne KWK-Systeme mit Großwärmepumpen tragen 5 % bei. Der Anteil der Versorgung basierend auf Geothermie sinkt anteilig aufgrund des höheren Bedarfes auf 1,3 % in 2050.

Tabelle 38: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung

	Randbedingung für die Optimierung	GreenEe1			GreenLate		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
KWK-Bestand	fix	6,2 %	3,4 %	0,0 %	5,4 %	2,6 %	6,2 %
KWK+GWP	Obergrenze	3,8 %	6,4 %	8,7 %	1,2 %	4,8 %	3,8 %
KWK/HWK + Solarthermie-saisonal + PtH	frei	0,8 %	3,0 %	1,8 %	3,9 %	5,3 %	0,8 %
Quartiers-WP	fix	1,0 %	1,6 %	2,2 %	0,3 %	1,2 %	1,0 %
Geothermie + Solarthermie-ganzjährig	Obergrenze	1,3 %	3,0 %	5,5 %	1,2 %	2,4 %	1,3 %
Müll + Biomasse	fix	1,9 %	1,1 %	1,2 %	1,7 %	0,9 %	1,9 %

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Bei der dezentralen Wärmeversorgung wird das langfristige Potenzial für Erdsonden in 2050 in der Optimierung nicht ausgeschöpft, da die konventionellen Techniken entsprechend des

Szenariencharakters langsamer verdrängt werden. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen in Rückkopplung mit dem Stromsystem werden zunächst mehr Luft-WP als Erdsonden-WP ausgebaut. Langfristig verbleiben noch 12,8 % Gaskessel als Primärwärmeerzeuger mit hohen Anteilen an Heizstabwärme sowie 1,4 % Solarthermie als Sekundärwärmeerzeuger. Dagegen ist in den anderen Green-Szenarien der Anteil von Sonden-WP deutlich größer.

Tabelle 39: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung

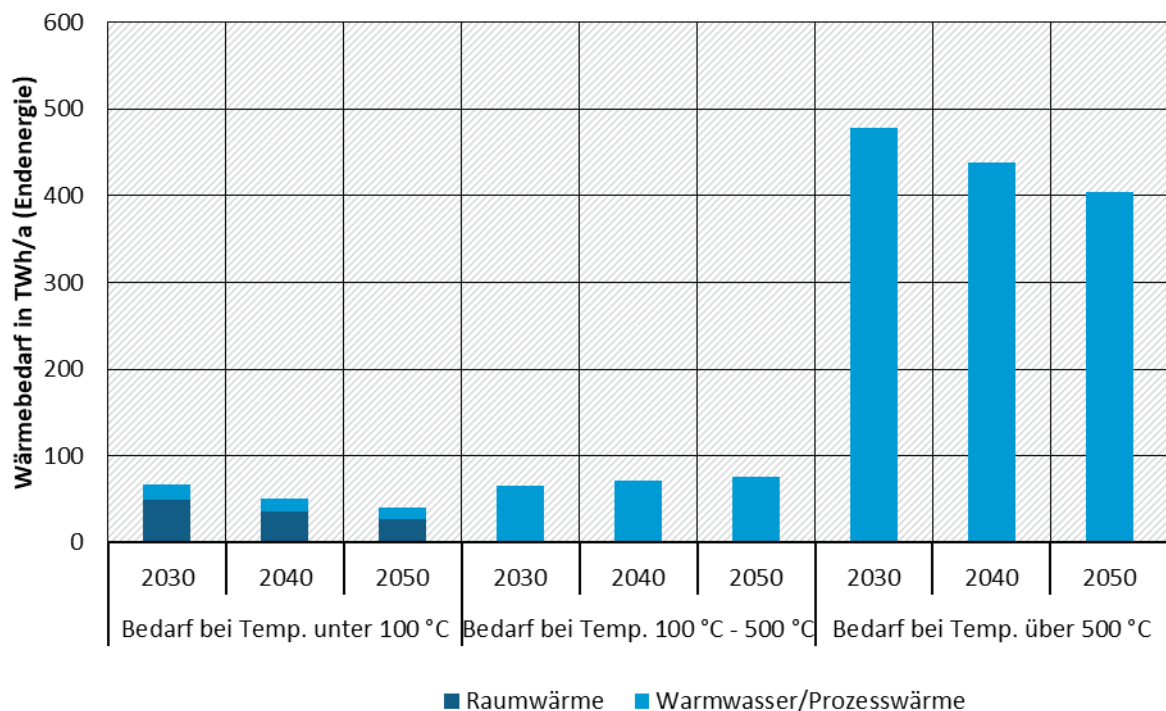
	Randbedingung für die Optimierung	GreenEe1			GreenLate		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Sonde-WP	Obergrenze aus GEMOD	8,4 %	29,8 %	48,7 %	3,6 %	14,3 %	36,4 %
Luft-WP	frei	5,8 %	11,9 %	30,0 %	5,6 %	23,2 %	28,6 %
Solarthermie	aus GEMOD	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,0 %	1,9 %	1,4 %
Strom monov.	aus GEMOD	2,5 %	1,7 %	1,2 %	2,6 %	1,2 %	0,7 %
Biomasse	aus GEMOD	2,0 %	0,2 %	0,0 %	2,4 %	0,3 %	0,0 %
Gas monov.	Untergrenze aus GEMOD	62,2 %	37,8 %	0,0 %	63,6 %	41,3 %	12,8 %
Öl monov.	aus GEMOD	4,1 %	0,0 %	0,0 %	7,0 %	0,2 %	0,0 %

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.3.2 Prozesswärme Industrie und GHD sowie Industriegebäude

Wie in den Annahmen zur Industrie in Kapitel 4.3 dargestellt geht der Endenergieverbrauch leicht zurück (siehe Abbildung 15).

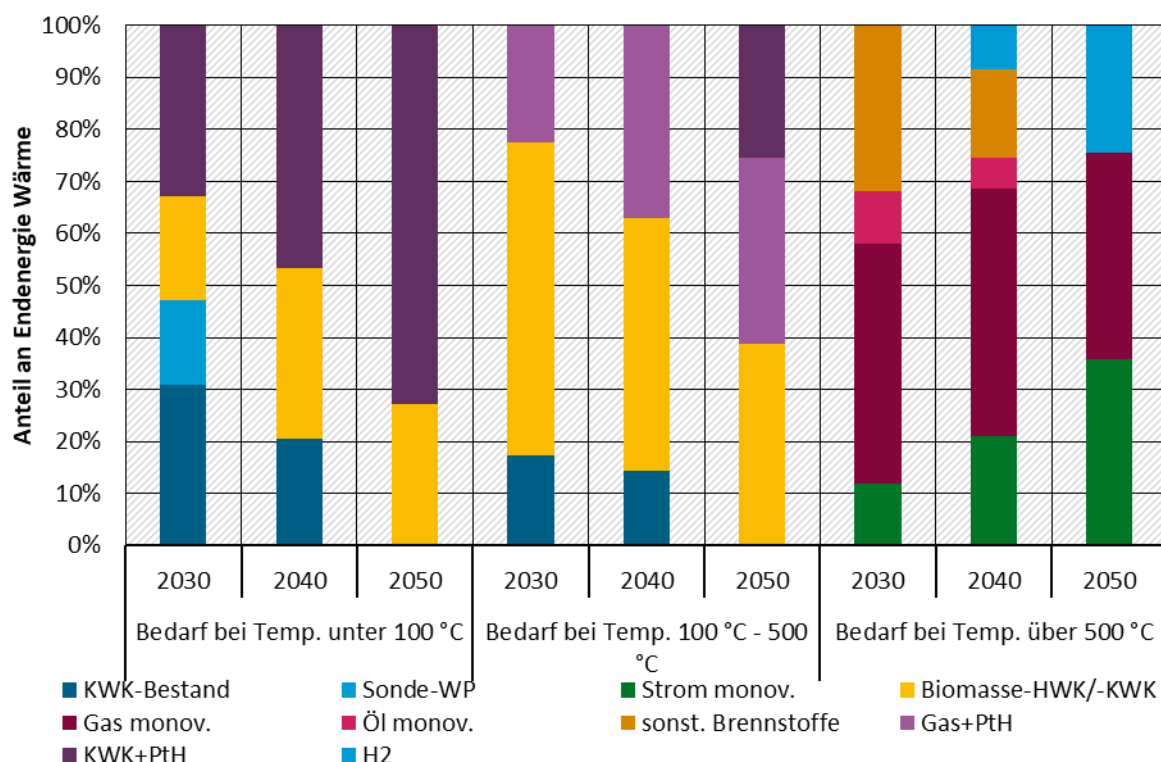
Abbildung 15: zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD-Prozesswärme – GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – GEMOD, SCOPE

Dabei wird diese Nachfrage wie in Abbildung 16 dargestellt je nach Temperaturniveau unterschiedlich versorgt. So werden für Bedarfe < 100°C ausschließlich Wärmepumpen (mit Abwärmenutzung hier vereinfacht als Luftwärmepumpen bezeichnet) eingesetzt. Für Prozesswärme-Dampfanwendungen (100-500°C) werden Hybridsysteme aus KWK und Elektrodenkesseln oder Heizkesseln und Elektrodenkesseln entsprechend der Potenzialgrenze für KWK (siehe Dittrich et al. 2020) eingesetzt. Neben diesen optimierten Ergebnissen sind zusätzlich die exogenen Vorgaben für Verfahren >500°C im zeitlichen Verlauf dargestellt.

Abbildung 16: zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme – GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

5.1.4 Verkehrssektor

Im Folgenden ist der resultierende Endenergieverbrauch im Verkehrssektor differenziert nach Verkehrsträgern von GreenLate (ohne ausgeglichene Handelsbilanz) im Vergleich zu GreenEe1 dargestellt. Aus dem Vergleich wird zunächst deutlich, dass sowohl nationaler als auch internationaler Verkehr in GreenLate deutlich mehr Endenergie benötigen als in GreenEe1. Dies gilt entsprechend der Szenarieneigenschaften auch für den Vergleich mit allen anderen Green-Szenarien. Der nationale Verkehr benötigt im Vergleich zu GreenEe1 2030 20 % und 2050 41 % mehr Endenergie, der internationale Verkehr 17 % und 46 % mehr.

Tabelle 40: EEV nach Verkehrsmitteln

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate
MIV	384	255	331	164	245	99	162
ÖSPV	16	15	12	13	10	11	8
ÖV Schiene	10	10	8	10	8	10	8

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate
Güter Straße	193	137	150	100	125	78	103
Güter Schiene	5	5	4	6	5	6	5
Güter Binnenschiff	4	3	3	3	3	3	3
Flug national	10	7	9	6	8	4	7
Flug internat.	87	105	125	91	122	77	116
Seeverkehr intern.	27	20	21	17	19	15	18
Gesamt national	621	432	518	301	404	211	297
International	114	124	147	108	142	92	134
Gesamt	735	556	665	408	546	303	431

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE und TREMOD

Alternativ ist in Tabelle 41 der Endenergiebedarf nach Energieträgern aufgeschlüsselt dargestellt. Da in GreenLate die Flottenumschichtung zu Elektro-Pkw deutlich zeitverzögert ist, im Straßengüterverkehr zudem keine Elektromobilität in signifikantem Umfang angenommen wird, ist der prozentuale Anteil von Strom am Endenergieverbrauch in GreenLate deutlich niedriger als in den anderen Green-Szenarien. In den Jahren 2030 und 2040 ist der Stromverbrauch in GreenLate dementsprechend auch niedriger. Im Jahr 2050 dagegen ist er in etwa gleich hoch zu den GreenEe-Szenarien und GreenMe, da niedrigere Elektromobilität einerseits und insgesamt höhere Verkehrsaufkommen und Endenergieverbräuche andererseits einander nahezu ausgleichen. Dementsprechend ist der verbleibende Kraftstoffbedarf für den nationalen und internationalen Verkehr im Jahr 2050 in GreenLate höher als in den anderen Green-Szenarien. Im Vergleich zu GreenEe1 ist der Kraftstoffbedarf knapp doppelt so hoch. In Summe für nationalen und internationalen Verkehr ist der Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 in GreenLate um 70 % höher gegenüber GreenEe1.

Tabelle 41: EEV nach Energieträgern

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate
Kraftst. Straße PV	398	250	328	126	204	45	87
Kraftst. Straße GV	193	127	146	68	113	39	81
Kraftst. Schiene+Binnenschiff	8	6	6	6	5	5	5
Kraftst. Flug nat.	10	7	9	6	8	4	7
Strom Straße PV	0	18	14	49	49	63	81
Strom Straße GV	0	9	4	32	12	40	22
Strom Straße Schiene	12	14	12	15	12	15	13
Kraftst. Internat.	114	124	147	108	142	92	134
Kraftstoff nat.	609	391	489	206	331	94	181

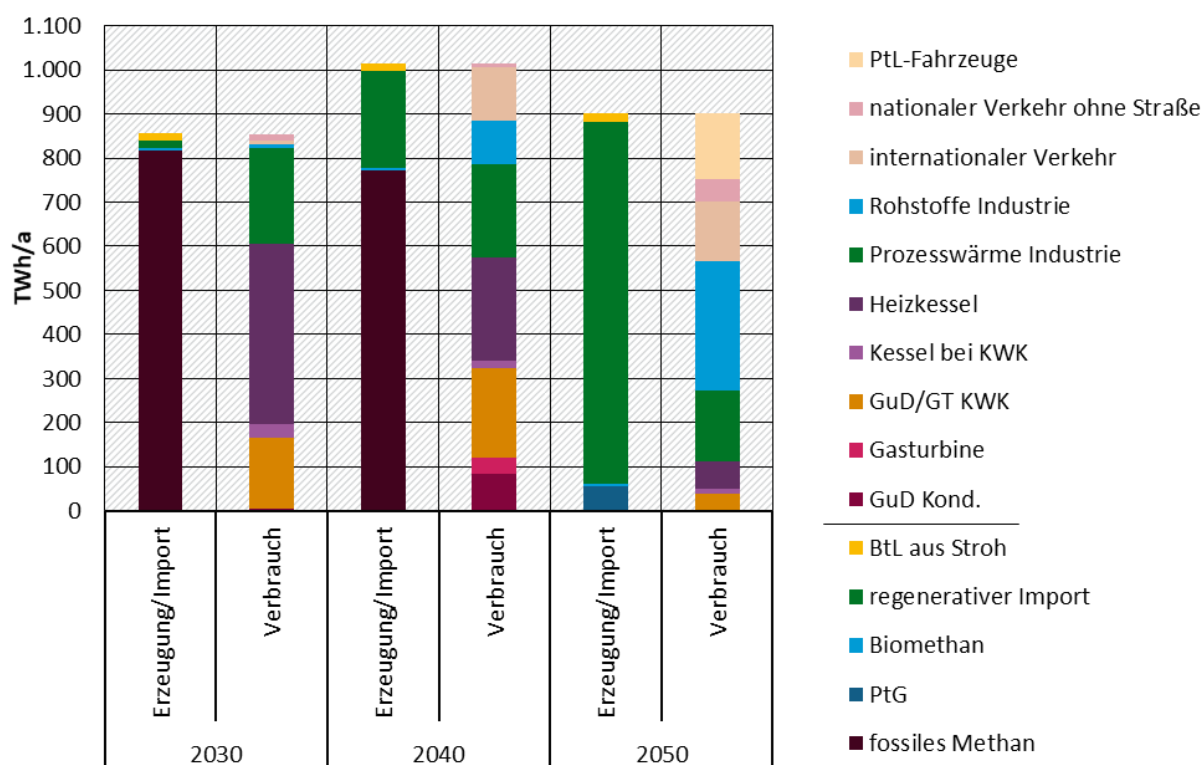
TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate	GreenEe1	GreenLate
Strom	12	41	29	95	74	118	116
Kraftstoff Summe	723	515	636	313	472	186	315

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE und TREMOD

5.1.5 Gas- und PtL-Versorgung

Durch den Ausstieg aus der Kohlenutzung, verbleiben neben Strom und Holz und anderen Reststoffe insbesondere Gase und Kraftstoffe als Energieträger. Die Auswertung der Gas- und Kraftstoffbilanz inkl. der nichtenergetischen Verbrauchs (Rohstoffe Industrie) ist in Abbildung 17 dargestellt. Dabei wird neben dem grundsätzlich hohen Verbrauchsniveau insbesondere 2040 der noch stagnierende fossile Erdgasverbrauch deutlich, der in Verbindung mit PtG/L-Importen zu einem zwischenzeitlich steigenden Brennstoffverbrauch führt.

Abbildung 17: Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und Versorgung in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien wird der insgesamt höhere Brenn- und Kraftstoffbedarf bedingt durch die Szenariencharakteristik deutlich. Im direkten Vergleich zu GreenEe1 (vergleichbare Handelsbilanz) liegt er in 2050 308 TWh höher. Die Importabhängigkeit liegt hier mit 91 % am höchsten gegenüber 86 % in GreenEe1.

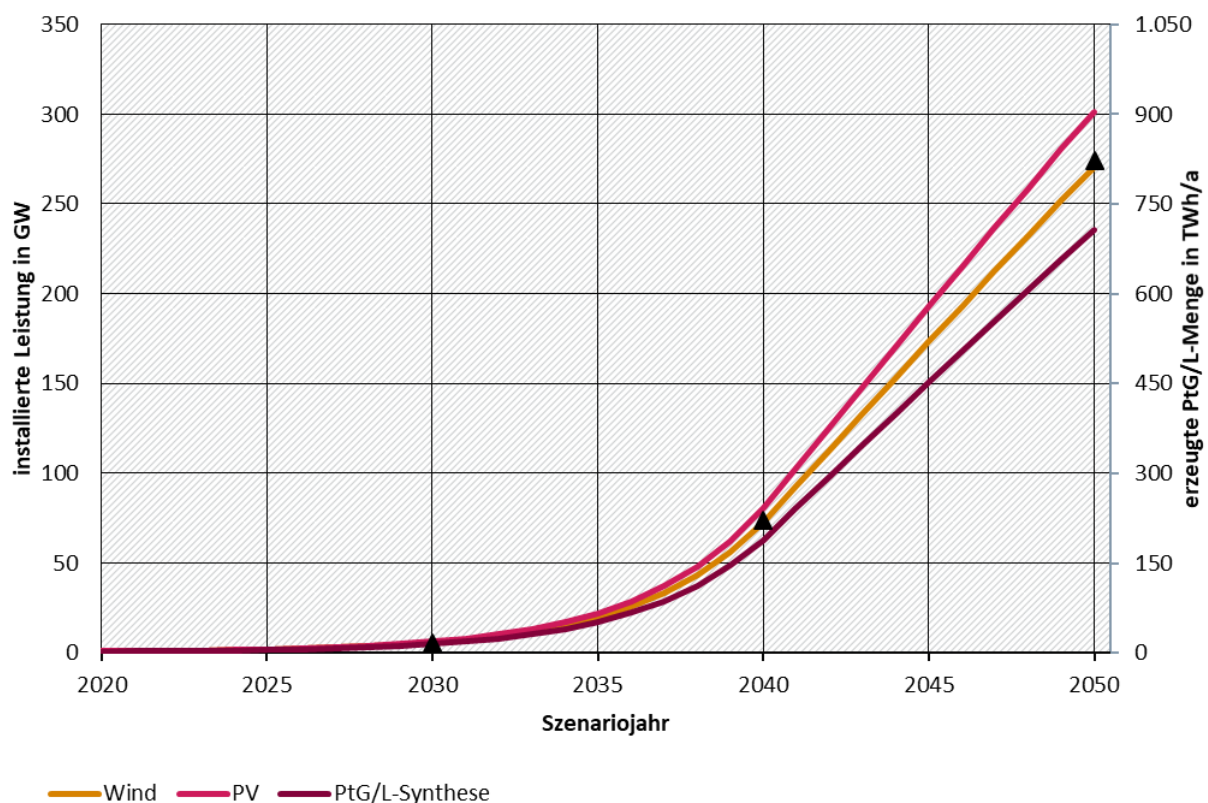
Tabelle 42: Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenLate und in GreenEe1

TWh/a		Erdgas	PtG/L-national	PtG/L-Import	Biomethan	BtL aus Stroh	SUMME
2030	GreenLate	816,0	0,0	16,4	7,0	15,9	855,3
	Green-Ee1	657,3	0,0	23,7	7,0	15,9	703,9
2040	GreenLate	770,7	0,0	220,5	7,0	16,8	1.015,0
	Green-Ee1	360,5	0,0	234,4	7,0	16,8	618,7
2050	GreenLate	0,0	54,8	823,1	5,2	17,7	900,9
	Green-Ee1	0,0	62,9	506,9	5,2	17,7	592,8

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Der für diesen PtG/L-Import notwendige Infrastrukturaufbau ist im Folgenden dargestellt. Im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien wird vor dem Hintergrund der Innovationsverzögerungen in GreenLate eine 50 %-ige Überbauung unterstellt. Entsprechend ergibt sich für die Jahre 2030 und 2040 eine geringere relative Importmenge. Vor diesem Hintergrund müssen insbesondere im Jahrzehnt nach 2040 massiv PtG/L-Kapazitäten und dafür erforderliche erneuerbare Energien ausgebaut werden.

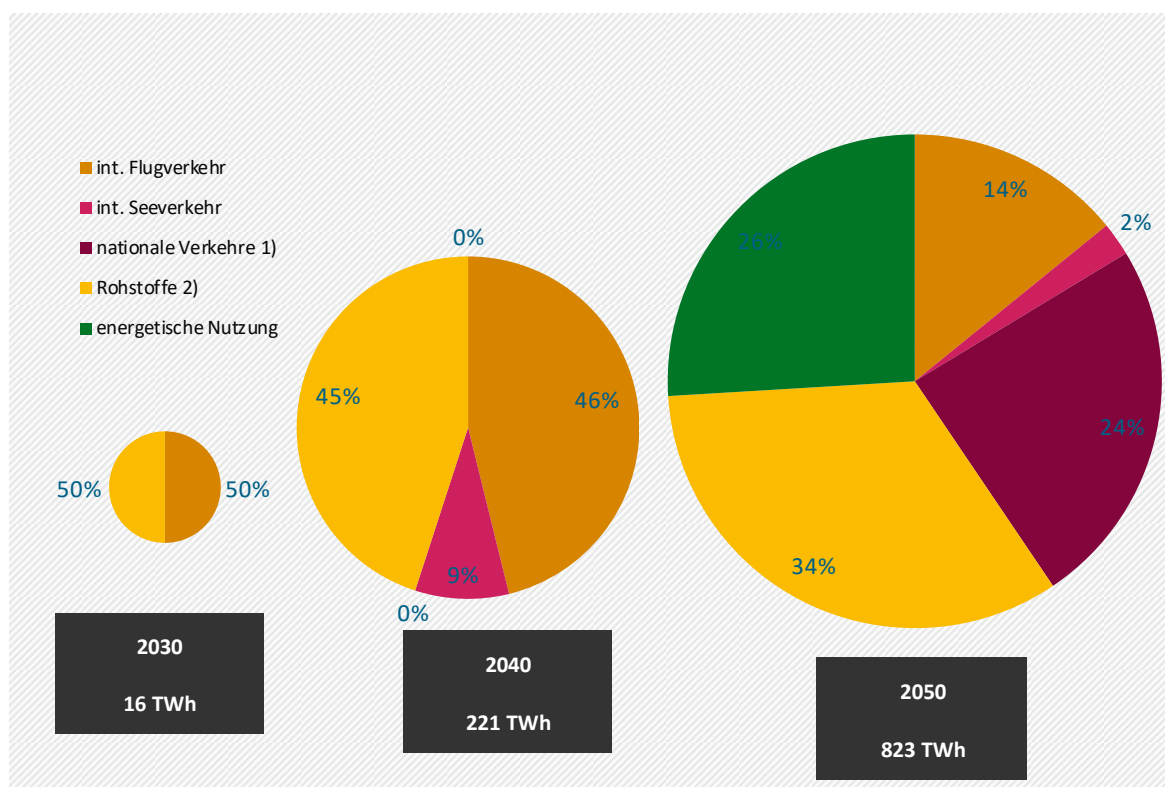
Abbildung 18: Notwendiger Markthochlauf für eine PtG/L-Import-Infrastruktur in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Wie in den anderen Green-Szenarien werden vornehmlich die Bedarfe des internationalen Verkehrs und der stofflichen Nutzung gedeckt. Wie in den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme GreenSupreme gelangen erst nach 2040 PtG/L-Importe in die nationalen Anwendungsbereiche, wie Verkehr, Gebäude und Industrie zur Prozesswärmeversorgung und wirken erst dann auf das nationale THG-Emissionsziel wie in Abbildung 19 dargestellt ist.

Abbildung 19: zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe) – GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Der Vergleich der PtX-Importe zwischen GreenLate und GreenEe1 im Pfad ist in Tabelle 43 noch einmal dargestellt. Trotz des stark verspäteten Markthochlaufs (so spät wie möglich bei 50 % Überbauung statt 15 % Überbauung in GreenEe1) werden 2030 und 2040 dennoch vergleichbare absolute Importmengen notwendig.

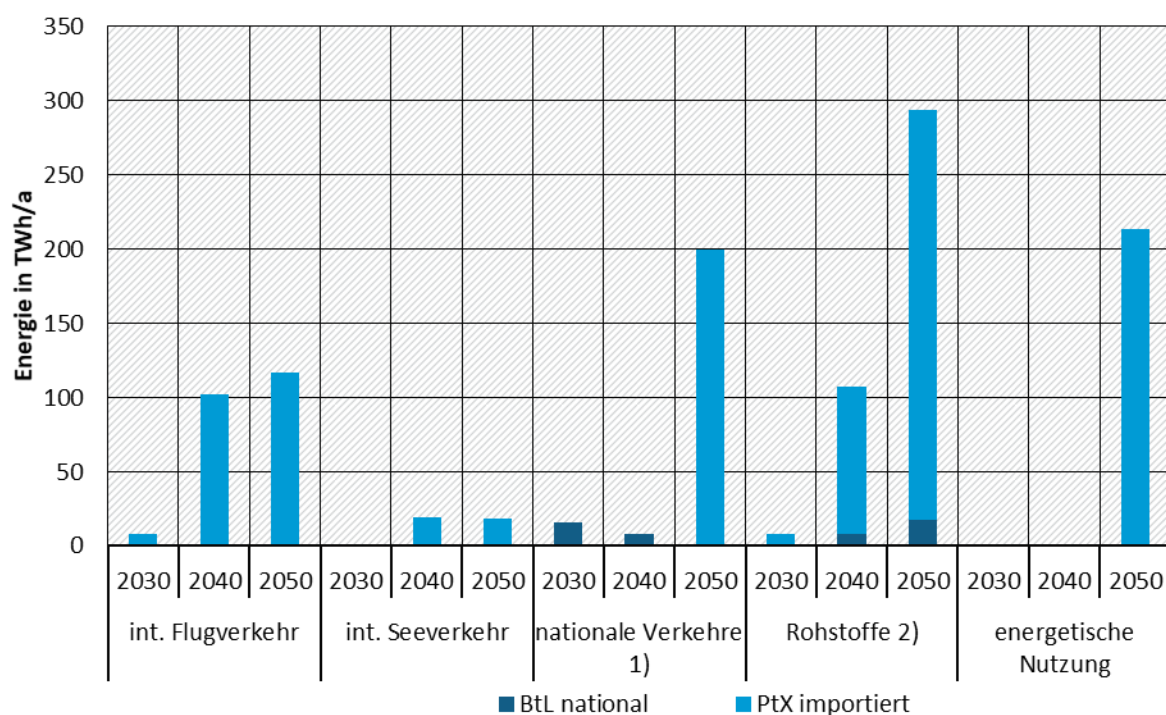
Tabelle 43: Entwicklung der PtG/L-Importmengen in GreenLate

	GreenEe1		GreenLate	
	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050
2030	23,6	5 %	16,4	2 %
2040	233,1	47 %	220,5	27 %
2050	493,6	100 %	823,1	100 %

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Dagegen werden Kraftstoffe aus Biomasse im Pfad auch auf das nationale Klimaziel durch eine anteilige Anwendung im nationalen Verkehr angerechnet. Der Vergleich ist in Abbildung 20 dargestellt.

Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert)



1) inkl Kraftstoffe GHD (Offroad-Verkehre)

2) stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie sowie Nutzung als Reduktionsmittel in der Gießerei- und NE-Metallindustrie

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

5.1.6 Europäischer Rahmen

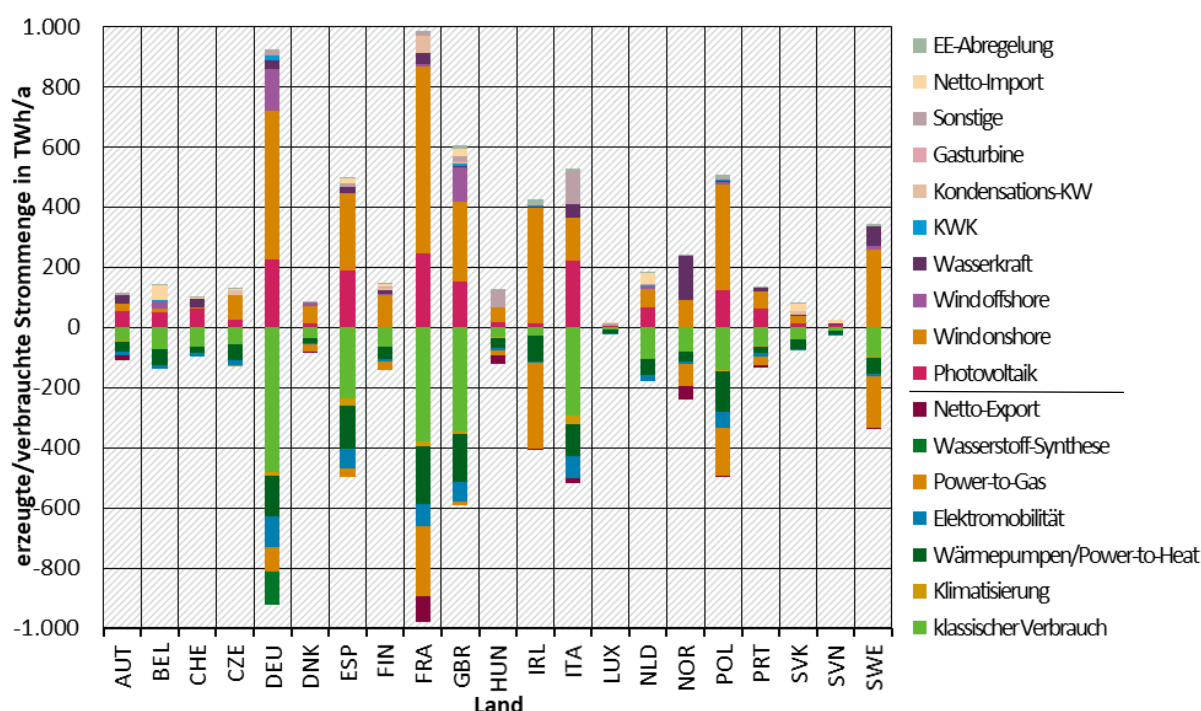
Die kostenoptimierte energiewirtschaftliche Modellierung für Deutschland ist in den europäischen Strommarkt integriert, um die Flexibilität des europäischen Netzes aber auch die unterschiedlichen Potentiale erneuerbarer Energien und deren unterschiedlichen Fluktuationsverhalten zu nutzen. Dabei wird unterstellt, dass die europäischen Staaten ggf. technologisch aufholen und bei der Entwicklung des Kraftwerksparkes sich wie Deutschland entsprechend der jeweiligen Green-Szenarien Charakteristik entwickeln.

Unter diesen Rahmenbedingungen werden auch die Entwicklungen des europäischen Kraftwerksparkes mit abgebildet und sind nachfolgend dargestellt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Fokus der RESCUE-Studie auf der nationalen Entwicklung in Deutschland lag.

5.1.6.1 Strombilanz

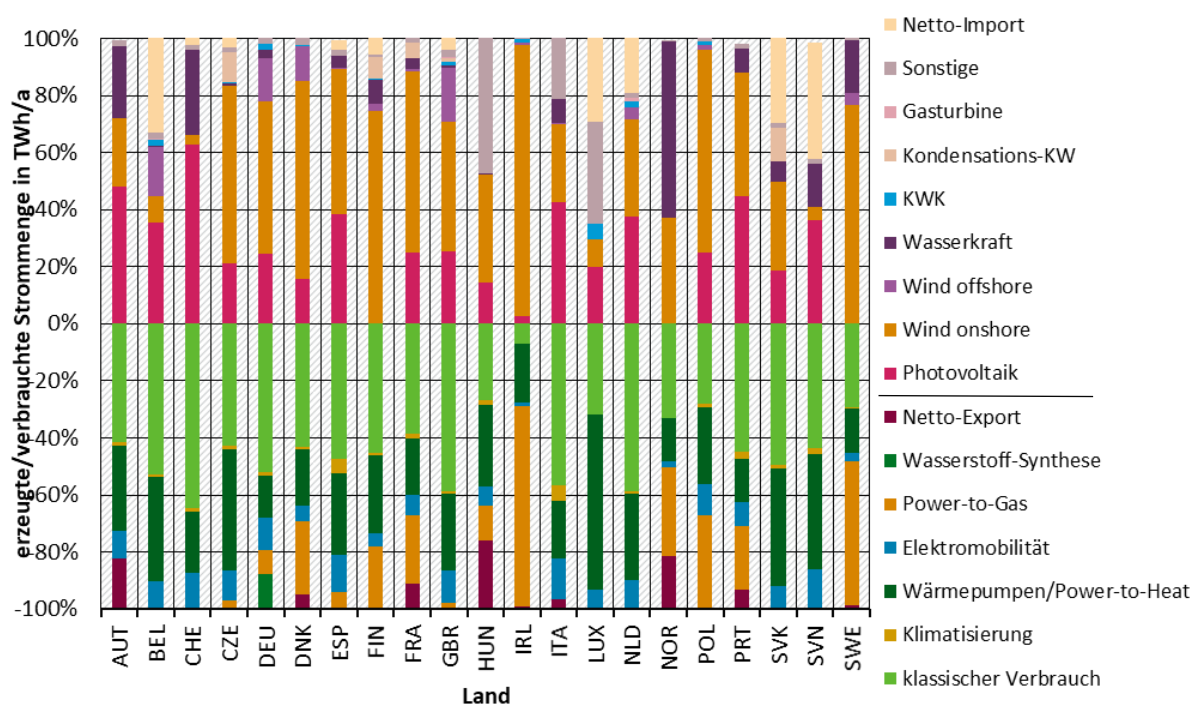
In Abbildung 21 ist das Ergebnis der europäischen Energiesystemoptimierung beispielhaft für 2050 für die Nettostromerzeugung und den Nettostromverbrauch zzgl. Verluste dargestellt. Grundsätzlich zeigen sich vergleichbare Entwicklungen wie in Deutschland. Während jedoch für Deutschland aufgrund der Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Szenarien eine zusätzliche Randbedingung einer ausgeglichenen Stromhandelsbilanz definiert wurde, zeigen sich zwischen den anderen Ländern Ungleichgewichte. Typische Exportländer sind Frankreich oder Norwegen, während andere Länder, wie Belgien oder Niederlande, auf Stromimporte angewiesen sind. Als ein großes Land weist Großbritannien aufgrund begrenzter Onshore-Potenziale auch einen gewissen Stromimport und deutlich geringeren Anteil am Gesamtverbrauch auf wie Abbildung 21 zeigt.

Abbildung 21: Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLate



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Abbildung 22: Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLate



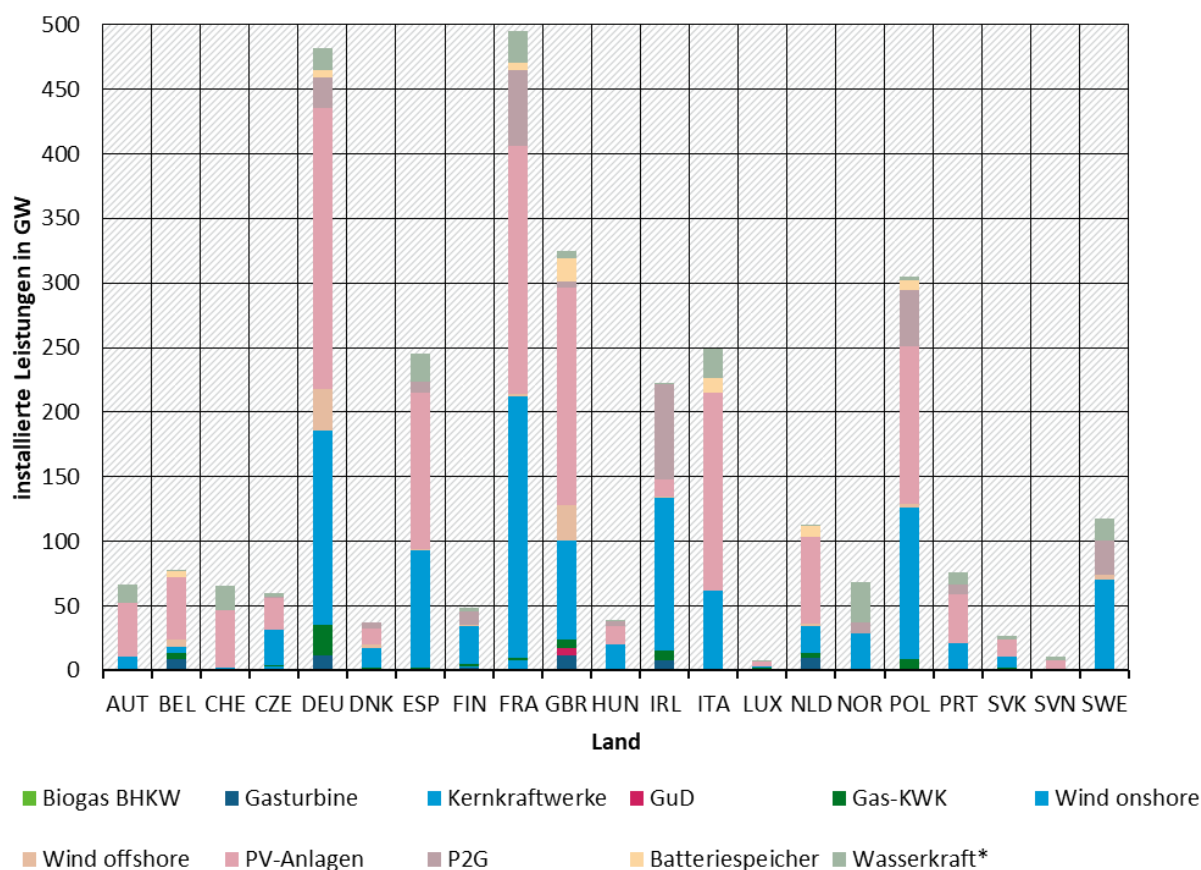
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.6.2 Installierte Leistungen

Die notwendigen installierten Leistungen für diese Stromerzeugung sind in Abbildung 23 dargestellt. Wie in Deutschland, ist auch in ganz Europa die Stromversorgung durch Photovoltaik und Windenergie onshore geprägt. Deutlich wird, dass einige Länder vor dem Hintergrund großer kostengünstiger Standorte für erneuerbare Energie hohe Leistungen von

PtG/PtL-Anlagen im jeweiligen nationalen Strommarkt integriert sind. Dies sind insbesondere Irland, Frankreich oder Polen.

Abbildung 23: Installierte Leistungen Europa 2050 in GreenLate



* Zuordnung Wasserkraftwerke nach Teilnahme an Marktgebieten, Standorte tlw. grenznahes Gebiet
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

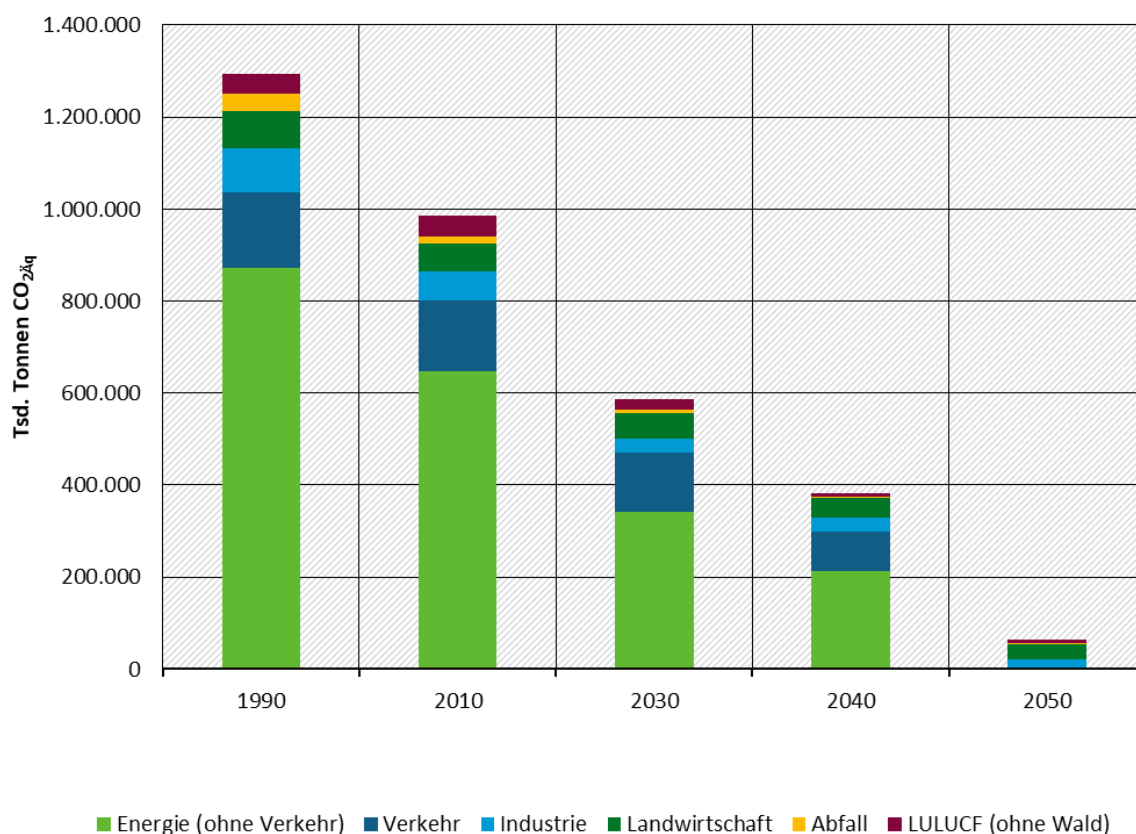
5.2 Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen

5.2.1 Übersicht über die Entwicklung aller THG-Emissionen

Die Treibhausgasemissionen (territoriale THG-Emissionen) in GreenLate, einschließlich LULUCF (ohne Wald), betragen 63,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 und gehen damit um 95,1 % gegenüber 1990 (UBA 2019b) zurück (Abbildung 24). Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 54,8 % [70,5 %]. Unter Einbeziehung der natürlichen Senken kann GreenLate der Treibhausgasneutralität nahekomen.

Die Berechnungen der THG-Emissionen erfolgen in diesem Bericht entlang der NIR-Vorgaben. Die THG-Emissionen wurden durch UBA auch nach dem Vorgehen im Klimaschutzplan berechnet (BMUB 2016a; UBA 2019a). Demnach erreicht GreenLate bis 2030 die Ziele des Klimaschutzplanes, der bis 2030 einen Rückgang um 55 % vorsieht.

Abbildung 24: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050



Quellen: UBA (2019b) 1990-2016, ifeu/IEE/SSG 2017-2050, eigene Darstellung

Die höchsten Rückgänge (nach NIR) bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (84 %) (Tabelle 44). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 30,4 % gegenüber 1990 zurückgehen.

In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, emissionsneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 92,2 %, 85,6 % und 77,8 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 59,1 %.

Tabelle 44: Emissionsminderungen GreenLate in 2030 und 2050 gegenüber 1990

	THG-Emissionen historisch bzw. GreenLate in Mio. t CO ₂ Äq			Rückgang gegenüber 1990 in %	
	1990 ¹	2030 ³	2050 ³	Bis 2030 ³	Bis 2050 ³
Energie, ohne Verkehr	871,3	342,9	0,0	-60,6 %	-100,0 %
Verkehr	164,4	126,7	0,0	-23,0 %	-100,0 %
Industrie	96,4	31,7	21,4	-67,1 %	-77,8 %
Landwirtschaft	79,8	55,5	32,6	-30,4 %	-59,1 %
Abfall	38	6,1	3,0	-84,0 %	-92,2 %

	THG-Emissionen historisch bzw. GreenLate in Mio. t CO ₂ Äq			Rückgang gegenüber 1990 in %	
LULUCF, ohne Wald	45,2	22,7	6,5	-49,8 %	-85,6 %
Summe	1.295,00	585,6	63,5	-54,8 %	-95,1 %

Quellen: ¹(UBA 2019b); (BMUB 2016a; UBA 2019a). Unstimmigkeiten gehen auf Rundungen zurück

Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs zu nennen. Im Verkehr setzen sich die THG-Emissionen aus den THG-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt und des Flugverkehrs zusammen. Bis 2030 steigen diese auf insgesamt 37,2 Mio. t CO₂Äq. In 2040 wird der internationale Verkehr ausschließlich fast vollständig mit synthetischen Kraftstoffen versorgt und verursacht nur noch 5,5 Mio. t CO₂Äq. In 2050 ist er dagegen bilanziell neutral.

Der Wald und die Produkte des Waldes stellten zusammengenommen in allen Jahren seit 1990 eine Senke dar. Für die zukünftige Waldentwicklung wurde das WEHAM-Szenario Naturschutz unterstellt, wonach der Wald auch weiterhin eine Senke bleiben und in 2050 etwa 34 Mio. t CO₂ aufnehmen wird (Rüter et al. 2017).

5.2.2 THG-Emissionen nach Quellgruppen

5.2.2.1 THG-Emissionen im Energiesektor einschließlich nationaler Verkehr

Die THG-Emissionen des Energiesektors sind im Folgenden entsprechend der Emittenten wie sie mittels SCOPE modelliert werden differenziert dargestellt.

Tabelle 45: Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO₂Äq

		2030	2040	2050
Stromerzeugung + KWK (SCOPE - endogen)	Öl-KWK-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Öl-Kondensations-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Steinkohle-KWK-Kraftwerke	23,2	0,0	0,0
	Steinkohle-Kondensationskraftw.	14,1	0,0	0,0
	Braunkohle-KWK-Kraftwerke	8,6	0,0	0,0
	Braunkohle-Kondensationskraftw.	16,8	0,0	0,0
	Gas-KWK-Kraftwerke	31,6	37,3	0,0
	GuD-Kondensationskraftwerke	0,8	14,3	0,0
	Gasturbinen-Kondensationskraftw.	0,0	6,3	0,0
Wärmeerzeugung außer KWK (SCOPE - endogen)	Dezentrale Gaskessel HH/GHD	82,7	46,8	0,0
	Dezentrale Ölkessel HH/GHD	12,1	0,4	0,0
	Müll-HKW – Fernwärme	1,5	0,7	0,0
	Gas -Industrie-Prozesswärme	48,9	50,0	0,0
	Braunkohle -Industrie-Prozessw.	3,0	1,4	0,0
	Steinkohle -Industrie-Prozessw.	50,5	26,2	0,0
	Öl -Industrie-Prozesswärme	15,0	8,3	0,0

		2030	2040	2050
Verkehr	Ersatzbrennstoff -Industrie-PW	0,5	0,3	0,0
	PKW	80,4	50,6	0,0
	LNF	6,7	4,0	0,0
	LZ/SZ ohne OH-Lkw	24,6	20,4	0,0
	OH-Lkw (Diesel-Anteil)	0,0	0,0	0,0
	Weitere Kraftstoffverbräuche im nationalen Verkehr	14,9	11,1	0,0
	Umwandlungssektor u.a.	31,5	19,9	0,0
Sonstige energetische THG-Emissionen (SCOPE - exogen)	Kraftstoffe GHD	2,1	1,8	0,0
	Summe	469,6	299,8	0,0

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE für Strom und Wärme, TREMOD für Verkehr

5.2.2.2 THG-Emissionen der Industrie

Die prozessbedingten THG-Emissionen aus der Industrie betragen im Jahr 2050 einschließlich F-Gase und sonstige THG-Emissionen 21,4 Mio. t CO_{2Äq}. Die energetisch bedingten THG-Emissionen werden wie in den anderen Anwendungsbereichen vollständig vermieden.

Dabei sind in allen Industriezweigen Rückgänge zu verzeichnen (Tabelle 46). In 2050 dominieren die THG-Emissionen der Zementindustrie die verbliebenen prozessbedingten THG-Emissionen in der Industrie mit 75,5 %, gefolgt von der Kalk- und Glasindustrie (18,2 % bzw. 2,9 %). Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr.

Tabelle 46: Prozessbedingte THG-Emissionen nach Industriesektoren in t CO_{2Äq}

Sektor	2030	2040	2050
Eisen- und Stahlindustrie	2.771.783	1.833.641	162.000
NE-Metallindustrie	1.305.677	761.736	0
Gießereiindustrie			
Zementindustrie	12.487.860	13.542.030	14.596.200
Glasindustrie	783.067	671.083	551.788
Kalkindustrie	4.510.227	4.018.293	3.526.360
Textilindustrie	0	0	0
Nahrungsmittelindustrie	0	0	0
Papierindustrie	0	0	0
Chemie	6.882.898	5.661.097	500.000

Sektor	2030	2040	2050
Zusammen	28.741.512	26.487.881	19.336.348

ifeu - eigene Berechnungen; Berechnung enthält keine energiebedingten THG-Emissionen

Zusätzlich entstehen fluorierter Treibhausgase. Sie gehen bis 2050 auf insgesamt 1,3 Mio. t CO_{2Äq} zurück. Sie sind in Tabelle 47 detailliert ausgewiesen.

Tabelle 47: THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO_{2Äq}

	2030	2040	2050
Aluminium- und Magnesiumindustrie	277.000	290.000	304.711
Produktion fluorierter Treibhausgase	300.000	320.000	339.792
Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen	293.000	114.000	24.296
Herstellung von Dämmstoffen	87.226	87.226	87.226
Feuerlöschmittel	0	0	0
Aerosole und Lösemittel	130.294	130.294	130.294
Halbleiterproduktion	136.270	136.270	136.270
Elektrische Betriebsmittel	166.000	115.000	51.031
Sonstige SF ₆ -Anwendungen	464.000	253.918	253.918
Summe	1.853.790	1.446.708	1.327.538

Quelle: (UBA 2014) für 2050; ifeu - eigene Berechnungen für 2030 und 2040

Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,76 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 zurück, die einzelnen Quellen sind in Tabelle 48 ausgewiesen. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO_{2Äq}.

Tabelle 48: THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO_{2Äq}

	2030	2040	2050
Anwendung von Farben und Lacken	361.160	329.405	255.310
Entfettung sowie Chemische Reinigung	59.348	55.879	47.785
Herstellung und Anwendung chemischer Produkte	88.292	83.086	70.938
Andere Anwendungen von Lösemitteln	528.779	487.393	390.824
sonstige Branchen (nicht im Bericht betrachtet)	99.667	69.767	0
Summe	1.137.246	1.025.529	764.857
Lachgas	13.000	13.000	13.000

Quelle: ifeu - eigene Berechnungen für 2030 und 2040 und eigene Berechnungen für 2050 auf der Basis von (UBA 2014)

5.2.2.3 THG-Emissionen der Landwirtschaft

Die im Kapitel 4.1 genannten Annahmen führen zu den in Tabelle 49 dargestellten THG-Emissionen.

Tabelle 49: THG-Emissionen Sektor Landwirtschaft im GreenLate-Szenario in t CO₂Äq

Landwirtschaft	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Tierhaltung / Verdauung	34.664.197	24.653.820	24.643.353	18.895.114	13.146.875
Wirtschaftsdüngermanagement	13.158.304	10.274.520	7.111.124	3.891.748	1.850.909
Böden	28.763.506	24.708.817	21.284.942	17.815.611	15.394.527
Kalkung	2.704.013	1.737.636	1.737.636	1.737.636	1.737.636
Harnstoffausbringung	479.601	587.408	528.061	498.388	468.715
Andere	393	1.052.329	181.711	0	0
Summe	79.770.014	63.014.531	55.486.828	42.838.498	32.598.662
Veränderung ggü. 1990		-21,0 %	-30,4 %	-46,3 %	-59,1 %

Emissionen nach IPCC (2006)

Quelle: (UBA 2019b) für 1990 und 2010, ifeu/IEE/SSG - ALMOD für 2030, 2040 und 2050

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 59,1 % in 2050 gegenüber 1990. Die größte absolute Änderung geht dabei auf die Tierhaltung zurück (-21,5 Mio. t CO₂Äq), die größte prozentuale Änderung verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (-88 %).

Die Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft beinhalten Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Tabelle 50 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase der Quellgruppe Landwirtschaft nach Art der Treibhausgase.

Tabelle 50: THG-Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen im GreenLate-Szenario in t CO₂Äq

	1990	2010	2030	2040	2050
Kohlendioxid	3.183.610	2.325.040	2.265.698	2.236.025	2.206.351
Methan	42.737.380	31.807.030	28.288.533	20.191.374	13.236.316
Lachgas	33.849.020	28.882.460	24.932.597	20.411.099	17.155.994

Emissionen nach IPCC (2006)

Quelle: (UBA 2016c) für 1990 und 2010, ifeu/IEE/SSG - ALMOD für 2030, 2040 und 2050

5.2.2.4 THG-Emissionen der Abfallwirtschaft

Die THG-Emissionen im Abfallsektor gehen auf 2,96 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Tabelle 51 zeigt die weitere Aufschlüsselung nach Untergruppen im Zeitverlauf. Etwa die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen.

Tabelle 51: THG-Emissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO₂Äq

Abfallsektor	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Deponie	34.250.000	10.675.000	3.083.333	1.483.333	700.000
MBA		141.918	130.859	105.049	141.918
Kompostierung/Vergärung	41.306	812.133	753.018	613.918	812.133
abflusslose Gruben	3.675.169	84.250	70.208	60.847	42.125

Abfallsektor	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Kläranlagen		2.214.140	1.975.248	1.815.987	1.497.465
Summe	37.966.475	14.016.221	6.082.841	4.244.044	2.958.557

Quelle: (UBA 2019b) für 1990 und 2010, ifeu für 2030 bis 2050

5.2.2.5 THG-Emissionen LULUCF (ohne Wald)

Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Die folgende Tabelle 52 zeigt die THG-Emissionen der einzelnen Untergruppen. Die verbleibenden THG-Emissionen werden auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen verursacht.

Tabelle 52: Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO₂Äq

LULUCF (ohne Wald)	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Acker und Grünland (Reduktion durch Wiedervernässung)	39.054.200	38.088.420	18.663.326	4.000.000	4.000.000
Torfabbau	4.127.590	4.074.000	1.018.500	0	0
Siedlungsfläche	1.885.560	3.267.200	3.011.467	2.840.978	2.500.000
Sonstiges	163	213			
Summe (ohne Wald)	45.230.154	45.643.035	22.693.159	6.840.978	6.500.000

Quelle: (UBA 2019b) für 1990 und 2010, (UBA 2014) für 2050, ifeu für 2030 und 2040

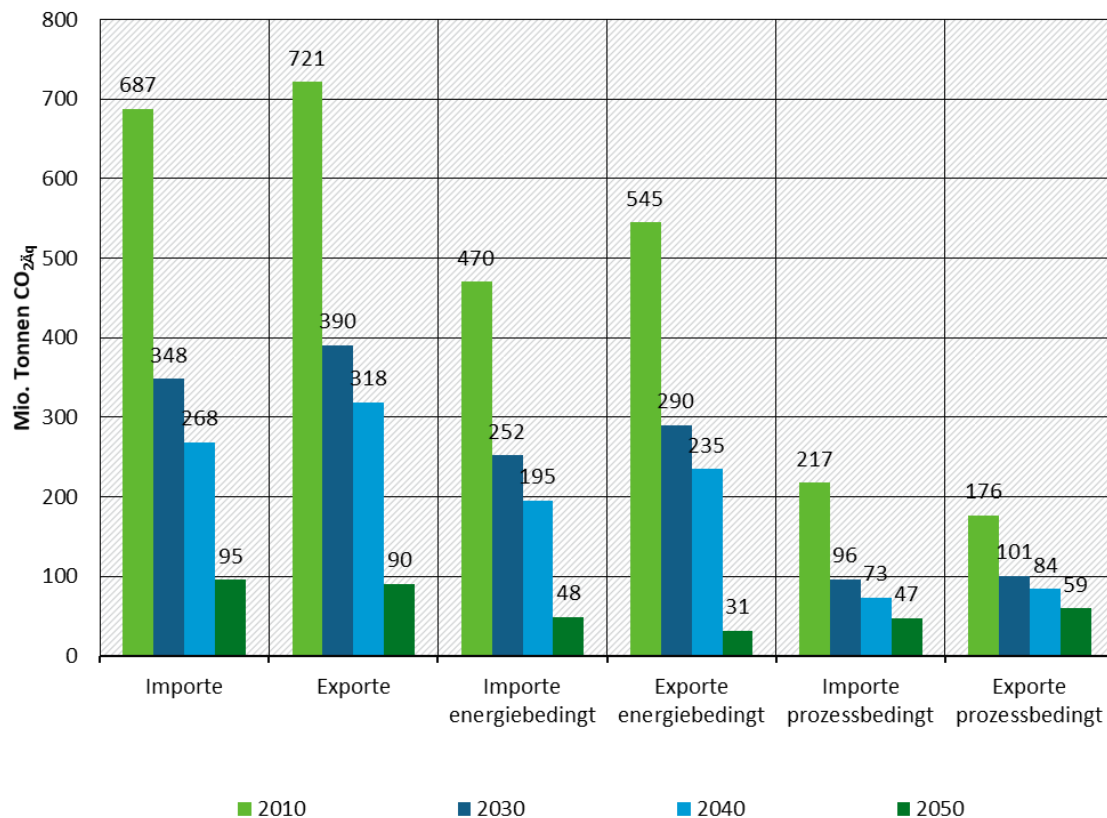
Im Zuge der Szenarienentwicklung ergab sich bezüglich der Wiedervernässung der Moore ein Attributionsproblem: die THG-Emissionen aus wiedervernässten Mooren können nicht auf Null zurückgehen, wie dies noch im THGND-Bericht, bzw. GreenEe angenommen wurde. Auch naturnahe Moore emittieren Treibhausgase (Niedermoores ca. 10 t CO₂Äq /ha, Hochmoore ca. 3 t CO₂Äq /ha). Diese sind allerdings nicht anthropogen und daher im Treibhausgasinventar mit Null angesetzt. Bei einer Wiedervernässung werden jedoch auch die Restemissionen als anthropogen berücksichtigt (und müssten theoretisch kalkuliert werden). Da nicht alle Moore tiefentwässert sind, bedeutet das im besten Falle, dass rund 2/3 der heutigen Treibhausgasemissionen aus den Mooren eingespart werden können. Da diese THG-Emissionen auch im Treibhausgasinventar nicht berücksichtigt werden, werden sie auch in diesem Projekt nicht auf das THG-Minderungsziel angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich erwähnt. Es handelt sich hierbei um THG-Emissionen in Höhe von 8,5 Mio t CO₂Äq.

5.2.3 THG-Emissionen einschließlich Vorketten

Die territoriale Emissionsberechnung wird ergänzt durch die Berechnung der THG-Emissionen, die bei Produktion und Transport der im- und exportierten Güter entstanden sind. Die Berechnung erfolgt nach dem UGR-Konzept. Dabei entsprechen die Güter der letzten inländischen Verwendung der Abgrenzung des Rohmaterialkonsums (RMC) und beinhalten den privaten und öffentlichen Konsum sowie die Investitionen. Die THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte sind bis 2050 rückläufig (Abbildung 25). Bis 2040 überwiegen die THG-Emissionsgehalte der Exporte die der Importe. Dies reflektiert insbesondere die hohe Energieintensität der Exporte. Das Verhältnis kehrt sich in 2050 um, wenn im Inland keine energiebedingten THG-Emissionen entstehen. Die THG-Emissionen der Exporte setzen sich dann

aus den energiebedingten THG-Emissionen der importierten Vorleistungen und aus nicht-energiebedingten THG-Emissionen zusammen. Letztere entstammen sowohl den importierten Vorleistungen als auch der inländischen Produktion und sind dominiert von den Quellgruppen Landwirtschaft und Industrie.

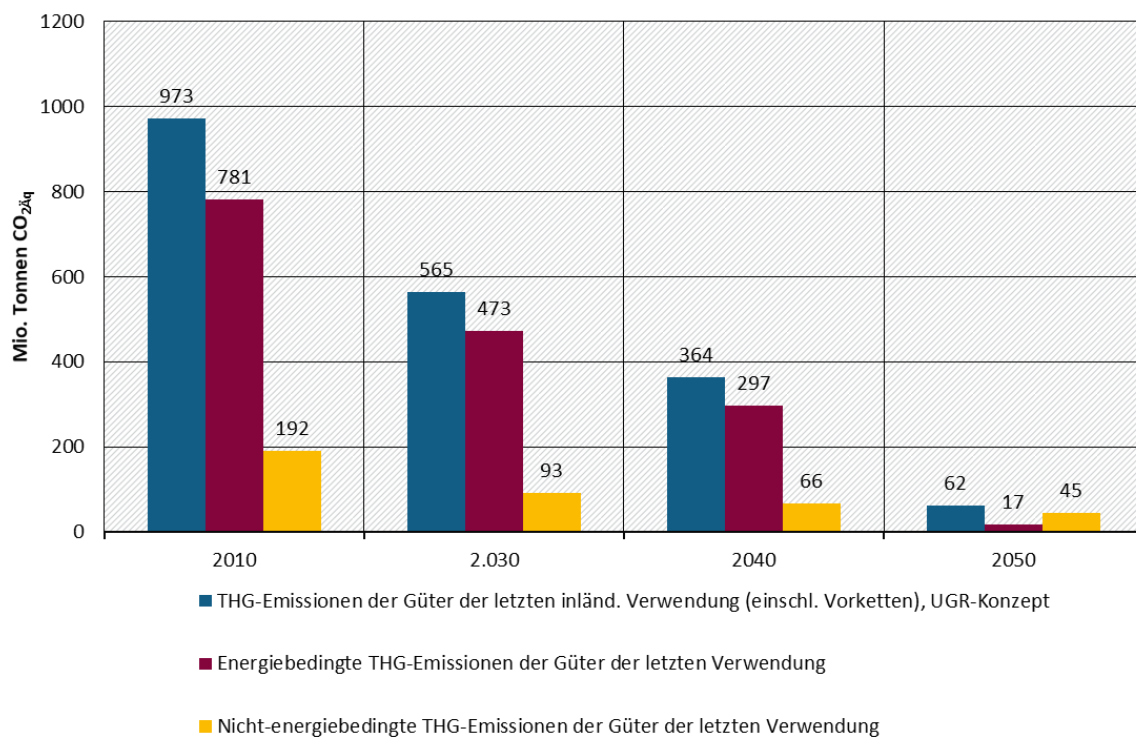
Abbildung 25: THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit rückläufige THG-Emissionen. Diese liegen in 2050 [2030/2040] nur noch bei 62,0 [565,0/ 363,7] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von 93,6 % gegenüber 2010 entspricht. In den Stützjahren dominieren die energiebedingten THG-Emissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen (Abbildung 26).

Abbildung 26: THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung

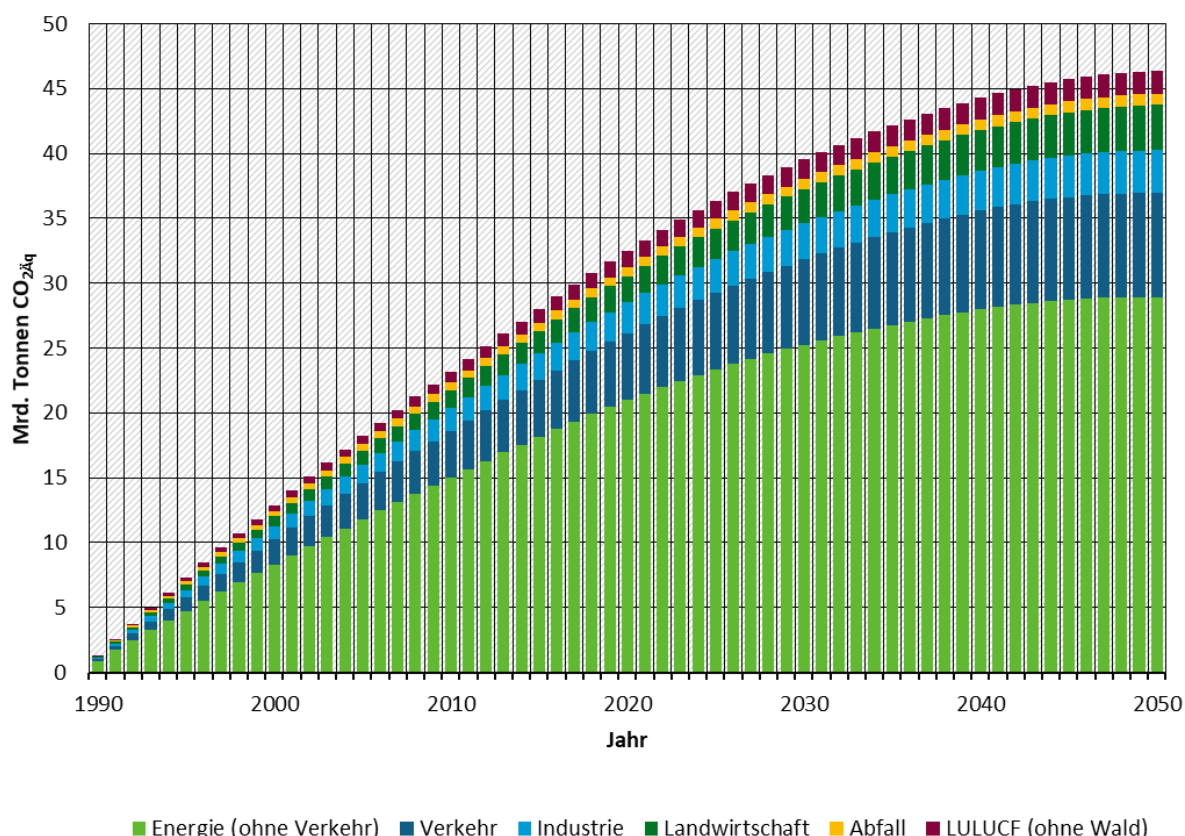


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.2.4 Kumulierte THG-Emissionen

Die THG-Emissionen, die Deutschland zwischen 1990 und 2016 (nach NIR) emittiert hat, summieren sich auf insgesamt 28,96 Mrd. t CO₂Äq. Bis 2050 kommen im Szenario GreenLate weitere 17,39 Mrd. t CO₂Äq hinzu. Der Großteil von 10,58 Mrd. t CO₂Äq entsteht im Zeitraum bis 2030. 62,4 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt (ohne Verkehr), 17,3 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,2 % und auf die Landwirtschaft 7,5 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050 (Abbildung 27).

Abbildung 27: Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050



Quellen: eigene Berechnungen basierend auf (UBA 2019b) für 1990 - 2016 und ifeu/IEE/SSG, 2017-2050

Zwischen 2010 und 2050 werden nach dem WEHAM-Szenario Naturschutz insgesamt rund 0,99 Mrd. t CO₂ im Wald gebunden. Dies entspricht einem Anteil von 4,7 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 2010 und 2050.

5.2.5 Vergleich der Treibhausgase mit dem GreenEe1-Szenario

Aufgrund der späteren und langsameren Transformation entstehen im GreenLate-Szenario mehr Treibhausgas-Emissionen als im GreenEe1-Szenario. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 17,6 % [13,5 %/48,9 %] mehr Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1 (Tabelle 53). Der relevanteste Unterschied mit 44 bzw. 95 Mio. Tonnen CO₂Äq in 2030 bzw. 2040 ist in der Quellgruppe Energie (ohne Verkehr) zu finden. Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenLate um 2,145 Mrd. Tonnen CO₂Äq (4,9 %) höher als in GreenEe1.

Tabelle 53: Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenLate und GreenEe in Tsd. Tonnen CO₂Äq

	GreenLate			GreenEe1			GreenLate ggü. GreenEe1 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Energie ohne Verkehr	342.893	213.605	0	307.946	129.206	0	111 %	165 %	
Verkehr	126.661	86.197	0	100.333	52.783	0	126 %	163 %	
Industrie	31.746	28.973	21.442	30.754	24.983	16.198	103 %	116 %	132 %
Landwirtschaft	55.487	42.838	32.599	51.540	39.081	28.387	108 %	110 %	115 %

	GreenLate			GreenEe1			GreenLate ggü. GreenEe1 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Abfall	6.083	4.244	2.959	6.045	4.192	2.903	101 %	101 %	102 %
LULUCF (ohne Wald)	22.693	6.841	6.500	19.265	6.841	6.500	118 %	100 %	100 %
Summe	585.562	382.698	63.499	515.884	257.087	53.988	114 %	149 %	118 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG

5.3 Rohstoffinanspruchnahme

5.3.1 Der gesamtwirtschaftliche Konsum von Primärrohstoffen

5.3.1.1 Der Konsum von Primärrohstoffen nach Rohstoffarten

Der gesamtwirtschaftliche kumulierte Aufwand von Primärrohstoffen zur Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC) im Jahre 2050 [2030/ 2040] summiert sich auf insgesamt 603,3 [959,6/ 778,9] Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente (RME). Dies ist ein Rückgang um 56,1 [30,2/ 43,3] % gegenüber 2010 (Tabelle 54).

Im Jahr 2050 haben die mineralischen Rohstoffe den größten Anteil von 51,1 % am RMC, gefolgt von biotischen Rohstoffen (27,0 %) und Metallerzen (20,5 %).

Tabelle 54: Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010 und 2050 in Rohstoffäquivalenten (RME)

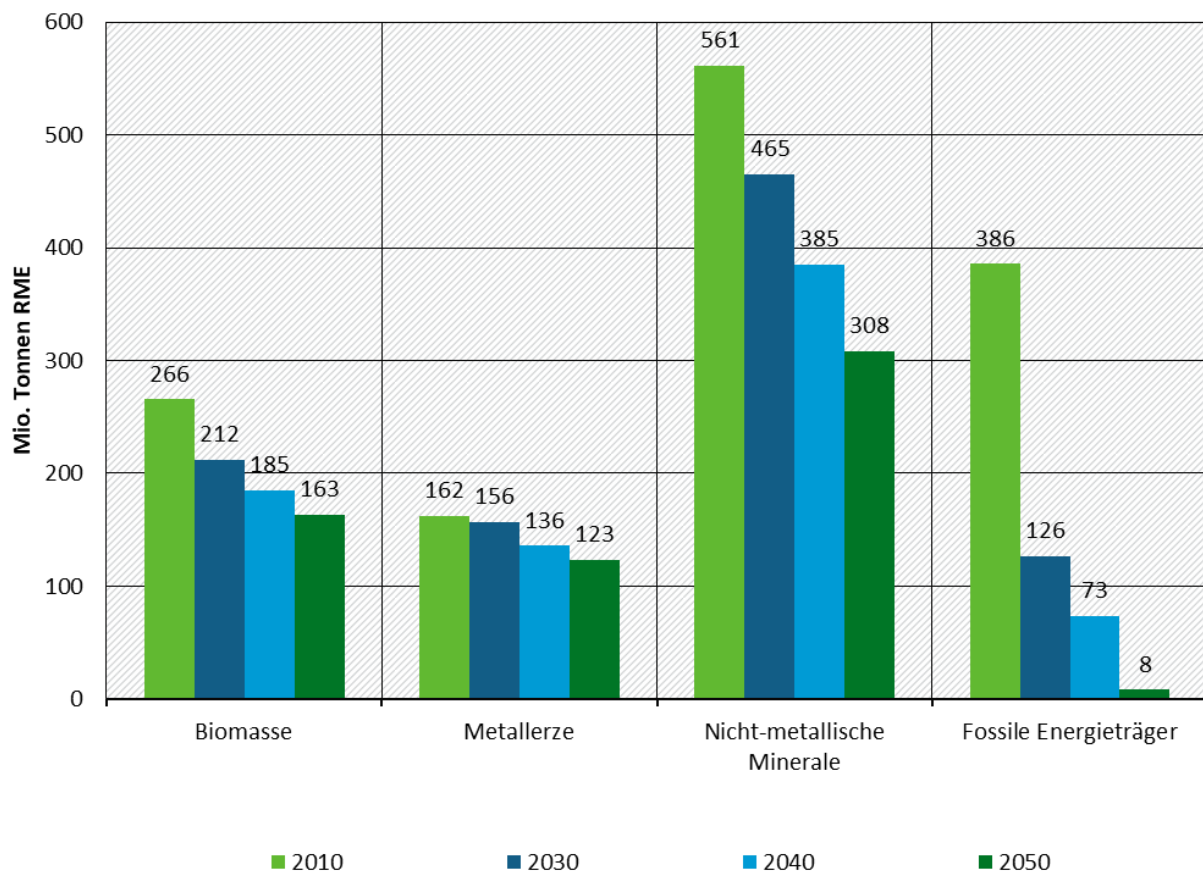
		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten in- ländischen Verwen- dung (RMC)
2010						
Primärroh- stoffe	Mio. t RME	1.021,3	1.669,3	2.690,6	1.316,1	1.374,5
Biomasse	Mio. t RME	249,2	173,5	422,7	157,2	265,5
Metallerze	Mio. t RME	0,4	663,7	664,1	502,0	162,1
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	575,6	262,3	837,9	276,8	561,1
Fossile Energieträger	Mio. t RME	196,1	569,8	765,8	380,1	385,7
2030						
Primärroh- stoffe	Mio. t RME	818,1	1.121,8	1.939,8	980,3	959,6
Biomasse	Mio. t RME	237,0	154,2	391,2	179,6	211,6
Metallerze	Mio. t RME	0,4	646,7	647,1	490,7	156,4
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	537,0	146,6	683,6	218,3	465,3
Fossile Energieträger	Mio. t RME	43,7	174,3	217,9	91,7	126,2

		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten in- ländischen Verwen- dung (RMC)
2040						
Primärroh- stoffe	Mio. t RME	675,1	980,4	1.655,5	876,6	778,9
Biomasse	Mio. t RME	208,4	143,4	351,7	167,1	184,7
Metallerze	Mio. t RME	0,4	560,6	561,0	425,3	135,7
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	466,1	137,4	603,5	218,4	385,2
Fossile Energieträger	Mio. t RME	0,218	138,9	139,1	65,8	73,4
2050						
Primärroh- stoffe	Mio. t RME	598,0	868,2	1.466,2	862,9	603,3
Biomasse	Mio. t RME	197,1	119,0	316,1	152,9	163,2
Metallerze	Mio. t RME	0,4	592,7	593,1	469,6	123,5
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	400,5	125,3	525,7	217,3	308,4
Fossile Energieträger	Mio. t RME	0	31,3	31,3	23,1	8,1

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die im Zuge der zuvor beschriebenen Transformation um 97,8 % zurückgehen (Abbildung 28 und Tabelle 54). Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (67,3 %). Im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 weiterhin fossile Energieträger verwendet, dies spiegelt sich in den fossilen Rohstoffen der letzten inländischen Verwendung (RMC) wider. So beinhalten die Importe weiterhin fossile Energieträger (Materialrucksack-Perspektive). Der RMC für nichtmetallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 45,0 %, wichtige Faktoren sind der Rückgang der Bauaktivitäten im Hoch- und Tiefbau. Der drittstärkste Rückgang bis 2050 (38,5 %) ist bei der Biomasse zu verzeichnen, relevante Gründe sind die Umstellung der Diäten und der Verzicht auf die energetische Nutzung von Primärbiomasse ab 2030. Der Rückgang des RMC verläuft nur bei den fossilen Rohstoffen sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

Abbildung 28: Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050

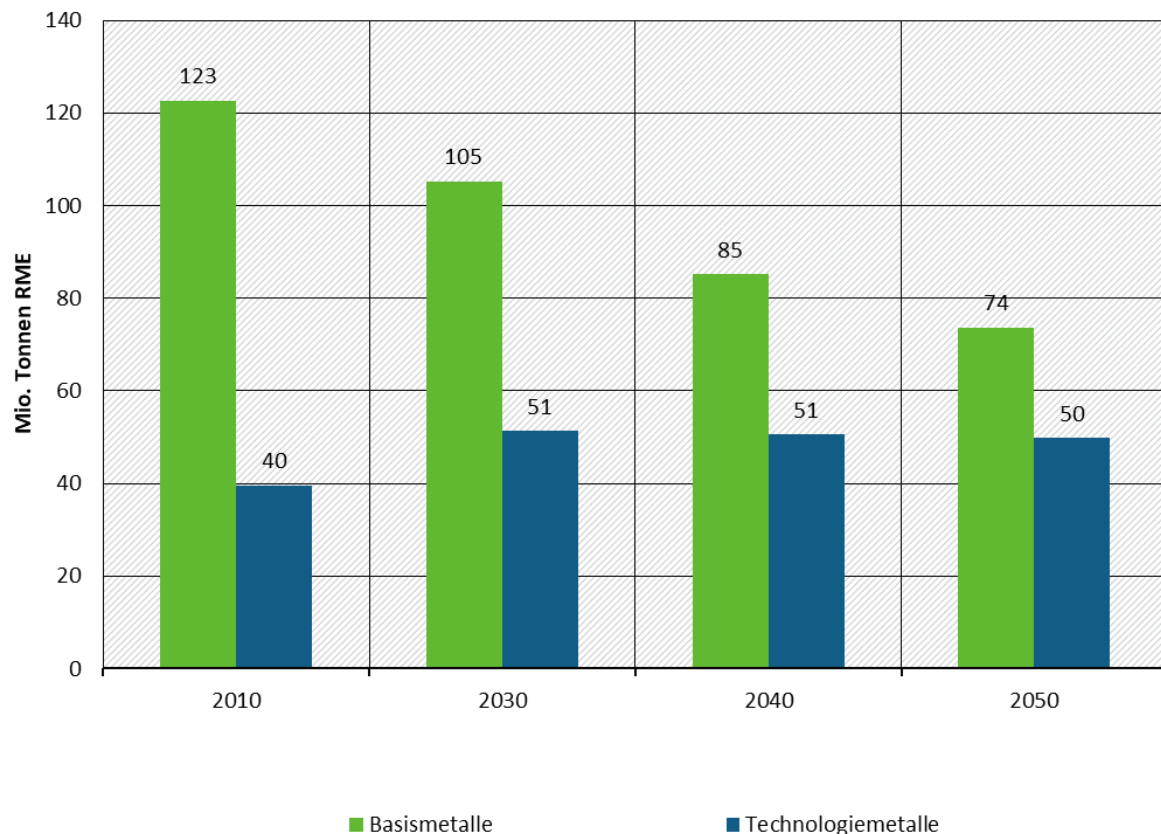


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der im Zeitverlauf kontinuierliche Rückgang des RMC der Metallerze verdeckt, dass innerhalb der Gruppe der Metalle Verschiebungen stattfinden. Die Basismetalle Eisen, Kupfer und Aluminium stellen 2010 im RMC in der Kategorie der Metalle den weitaus größten Anteil von 75,6 %, während ihr Anteil 2050 nur noch bei 59,7 % liegt (Abbildung 29). Dabei ist die nachgefragte Menge nach Basismetallen rückläufig. Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach Technologie- und Edelmetallen⁶, die unter anderem in der Energieinfrastruktur benötigt werden, insbesondere bis 2030 an und geht bis 2050 sehr leicht zurück.

⁶ In URMOD werden neben Eisen, Kupfer und Aluminium (jeweils primär und sekundär) folgende Metalle unterschieden: Nickel, Zinn, Zink, Blei, Wolfram, Gold, Silber, Platinmetalle, Uran und Thorium, Tantal, Magnesium, Titan, Mangan, Chrom. Alle weiteren Metalle sind in der Kategorie Sonstige zusammengefasst. In obiger Abbildung sind alle Metalle außer Eisen, Kupfer und Aluminium unter Technologie- und Edelmetallen zusammengefasst.

Abbildung 29: Letzte inländische Verwendung der Basis- und Technologie- bzw. Edelmetalle, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG- URMOD

5.3.1.2 Die Veränderung der Rohstoffproduktivität

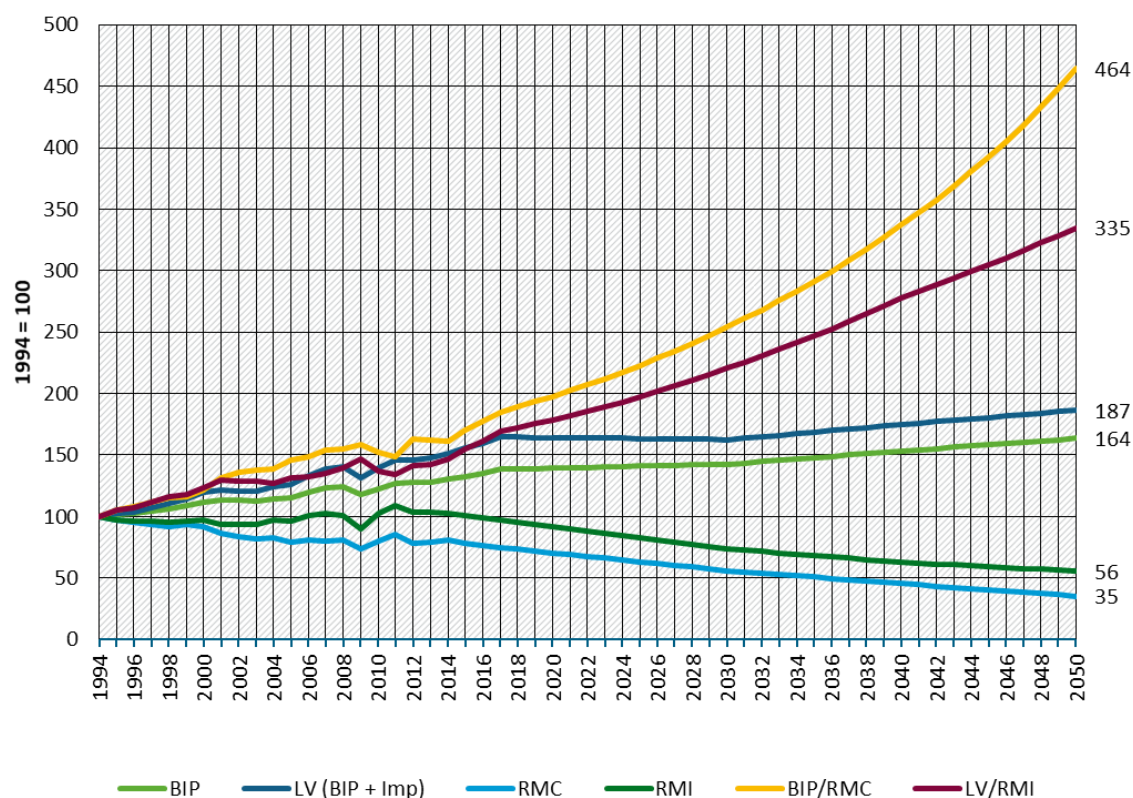
In diesem Bericht werden zwei verschiedene Bezugswerte betrachtet, welche die wirtschaftliche Leistung zum kumulierten Rohstoffaufwand in Beziehung setzen:

- ▶ **Rohstoffproduktivität:** im internationalen Kontext Bruttoinlandsprodukt je Einheit DMC bzw. RMC, in Deutschland Bruttoinlandsprodukt je Einheit DMI_{abiotisch}. Dieser Indikator (im Folgenden: BIP je RMC) setzt die monetäre Größe Bruttoinlandsprodukt in Beziehung zum kumulierten Rohstoffaufwand zur Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung in Tonnen (Letzte Verwendung-Exporte=Konsum + Investitionen).
- ▶ **Gesamtrohstoffproduktivität:** Letzte Verwendung (LV=BIP + Importe) je Einheit RMI. Dieser Indikator setzt den Wert des Bruttoinlandsprodukts zuzüglich Importe in Beziehung zu der korrespondierenden Größe kumulierter Rohstoffaufwand zur Herstellung aller Güter der letzten Verwendung in Tonnen.

Der international eher übliche Indikator ist die Rohstoffproduktivität (BIP / DMC bzw. BIP/RMC). Die Gesamtrohstoffproduktivität ist in Deutschland ein Zielindikator.

Abbildung 30 vergleicht zunächst die Entwicklung der Komponenten RMI, des RMC und des BIP zwischen 1994 und 2015, sowie die Entwicklung bis 2050, wobei zwischen den Stützjahren linear interpoliert wurde. Der Anstieg des BIP von durchschnittlich 0,7 % p.a. im Zeitraum 2010 bis 2050 entspricht der für das Projekt getroffenen Annahme.

Abbildung 30: Der Verlauf ausgewählter Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050

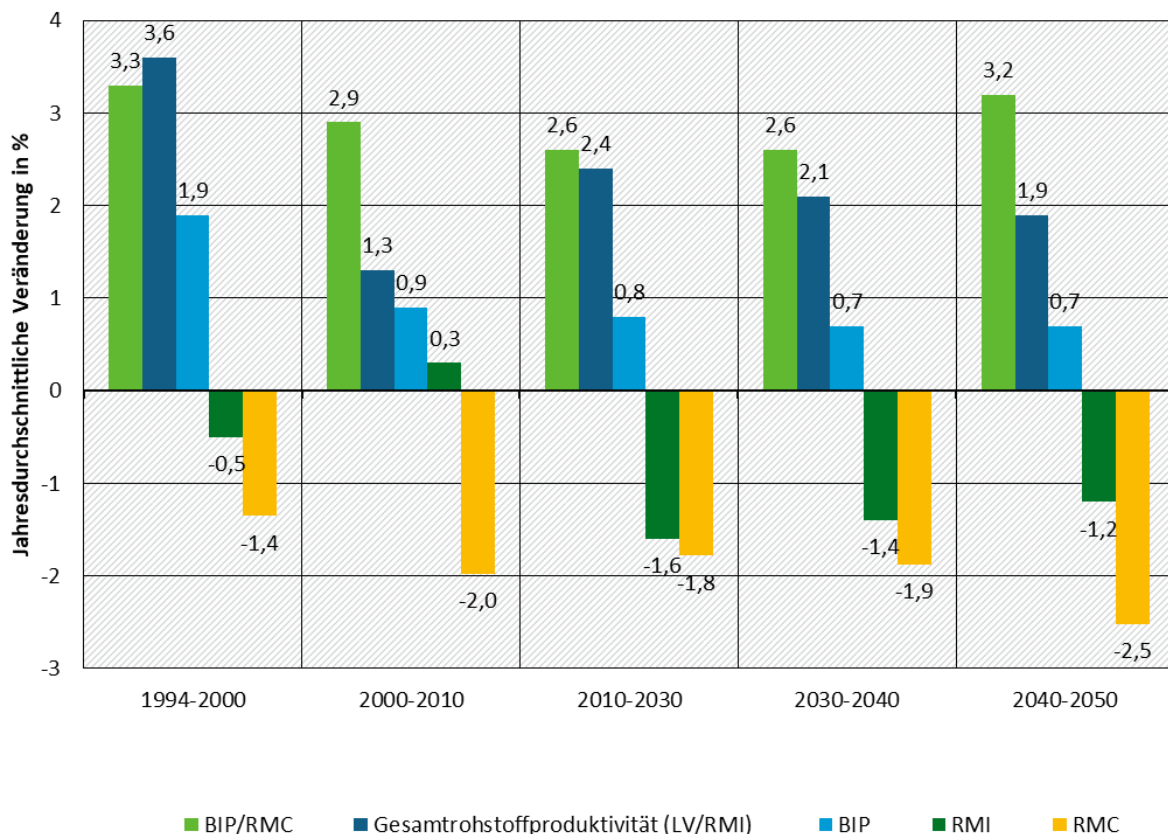


Quelle: ifeu/IEE/SSG - URMOD für 2010, 2030, 2040 und 2050 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA (Destatis 2018a)). Ab 2016 lineare Interpolation zwischen den Stützjahren und dem Zieljahr.

Während das BIP im Zeitablauf steigt, vermindert sich der RMC kontinuierlich. Der RMI bewegt sich zwischen 1994 und 2016 in etwa auf gleichem Niveau. Diese Entwicklung spiegelt wider, dass die Importe und Exporte in diesem Zeitraum deutlich stärker gestiegen sind als das BIP. Der starke Importanstieg schlägt sich im RMI nieder, während die Effekte steigender Importe und Exporte sich beim Indikator RMC weitgehend ausgleichen. Für den Zeitraum nach 2016 wurde dagegen ein geringerer Anstieg der Außenhandelsverflechtung unterstellt. Daher sind für diesen Zeitraum die Entwicklungen von RMI und RMC recht ähnlich. Im Vergleich zu 1994 sinkt der RMI auf 56 Indexpunkte und der RMC auf 35 Indexpunkte, während die Gesamtrohstoffproduktivität auf 335 Indexpunkte steigt.

Die resultierende Entwicklung der jahresdurchschnittlichen Änderungen sind in Abbildung 31 dargestellt. Auffallend ist, dass der RMI im Zeitraum 1994-2000 um 0,5 % p.a. fällt, im Zeitraum 2000-2010 sogar steigt (+0,3 % p.a.), und sich nach 2010 mit zwischen -1,2 und -1,6 % p.a. deutlich vermindert. Ursächlich für die Differenzen ist, wie bereits erwähnt, vor allem die unterschiedliche Entwicklung der Außenhandelsverflechtung. In den ersten beiden Zeitabschnitten steigt die Außenhandelsverflechtung deutlich, während für den Zeitraum nach 2010 eine schwächere Zunahme angenommen wurde. Die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität ist somit über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRes II (BMU 2020; BMUB 2016b) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2018).

Abbildung 31: Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität in jahresdurchschnittlichen Veränderungen

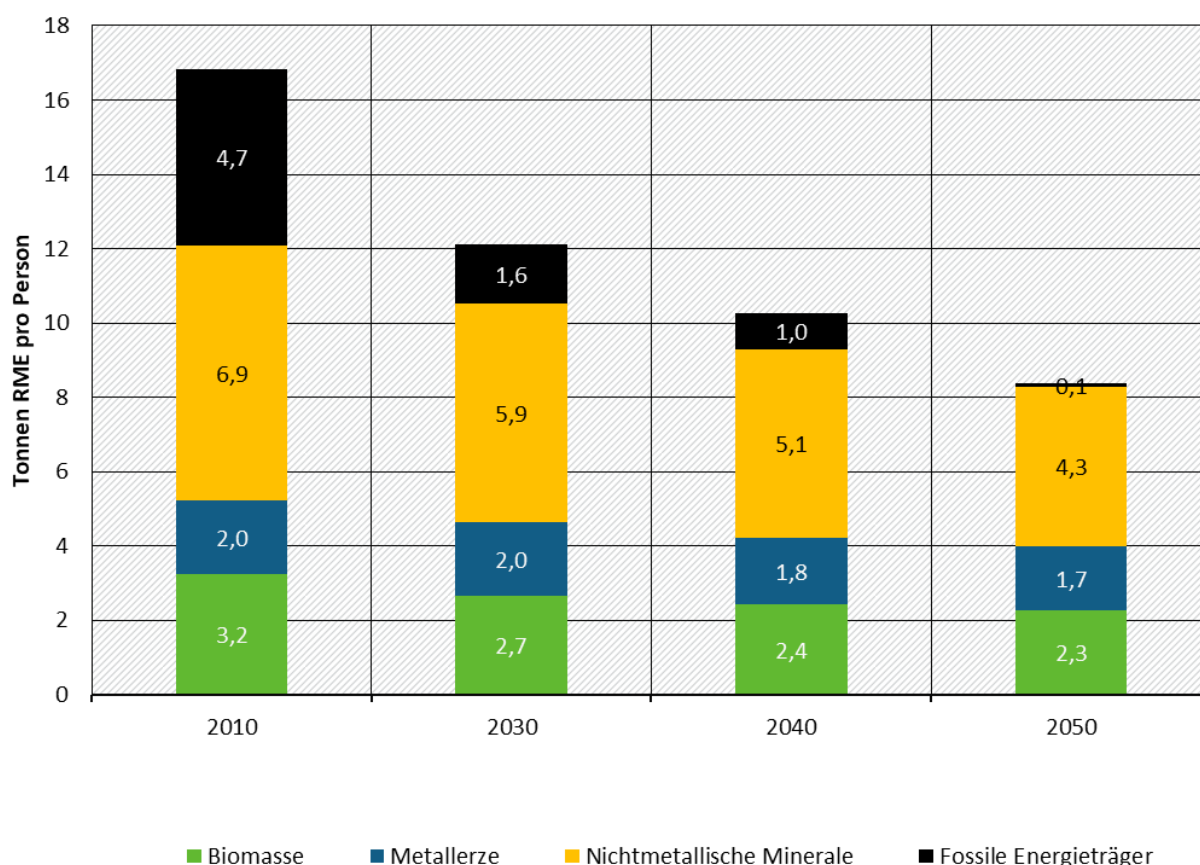


Quellen: ifeu/IEE/SSG - URMOD für 2010, 2030, 2040 und 2050 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA (Destatis 2018a)). Zwischen den Stützjahren lineare Interpolation.

5.3.1.3 Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum in 2050

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen beläuft sich im Jahre 2050 auf 8,4 Tonnen p.a., was einer Halbierung im Vergleich zu 2010 entspricht (-50,1 %) (Abbildung 32). Zum Vergleich: der global durchschnittliche Rohstoffkonsum lag bei 10 Tonnen in 2010 (UNEP 2016) bzw. 12 Tonnen in 2015.

Abbildung 32: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person in 2010, 2030, 2040 und 2050



Der Pro-Kopf-Konsum von primärer Biomasse verringert sich zwischen 2010 und 2050 von 3,2 auf 2,3 Tonnen. Dies ist eine Größenordnung, die auch in Ländern mit einem geringen Anteil tierischer Produkte in der Nahrung gemessen wird. Der Wert für Metalle (1,7 Tonnen) liegt trotz Recyclinganstrengungen bei den Massenmetallen über dem gegenwärtigen globalen Durchschnitt von 1,1 Tonnen pro Person (UNEP 2016). Der Konsum von nicht-metallischen mineralischen Rohstoffen (4,3 Tonnen pro Person) liegt knapp unter der Höhe des gegenwärtigen globalen Durchschnittswertes von 4,4 Tonnen pro Person. Die Höhe zeigt vor allem, welche Materialinputs weiterhin für die Aufrechterhaltung der überwiegend auf nichtmetallischen Mineralien basierten Technosphäre benötigt werden.

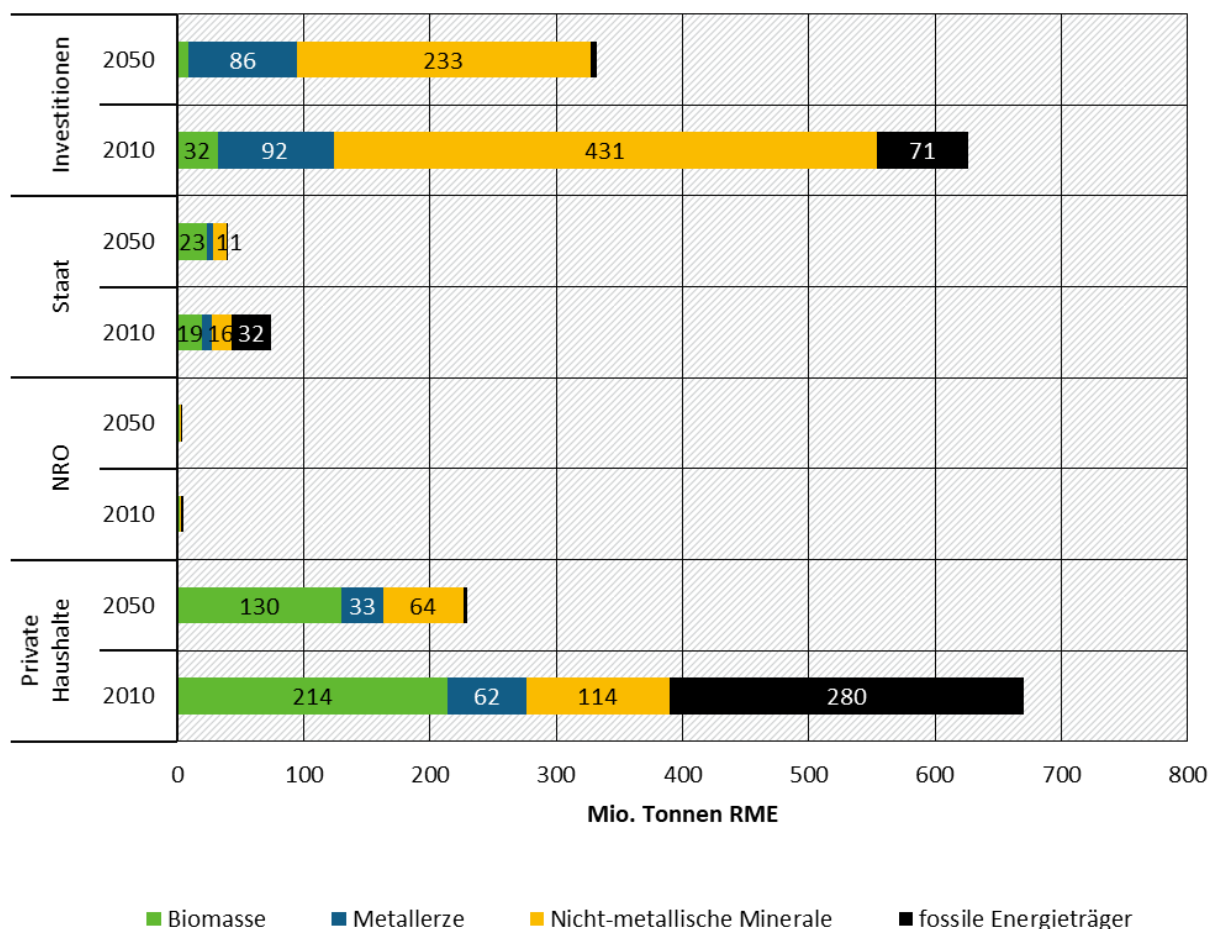
5.3.1.4 Der Primärrohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfeldern in 2050

In 2050 werden rund 332 Millionen Tonnen Rohstoffe (in Rohmaterialäquivalenten) in Bauwerken, Infrastrukturen und Anlagen investiert, das heißt längerfristig gebunden (Abbildung 33). Die Investitionen werden von nicht-metallischen Mineralen dominiert, die 70,3 % der Rohstoffe der Investitionen ausmachen. Weitere 25,9 % der Rohstoffaufwendungen sind Metallerze, der Anteil der Biomasse und der fossilen Rohstoffe ist insgesamt gering (2,6 % bzw. 1,3 %). Im Vergleich zu 2010 gehen die Rohstoffaufwendungen für Investitionen um 47 % zurück.

Die privaten Haushalte konsumieren 230 Millionen Tonnen Rohstoffe. Den größten Anteil stellt die Biomasse mit 56,5 %, gefolgt von nicht-metallischen Mineralen (27,8 %) und Metallerzen (14,3 %). Die privaten Haushalte nehmen im Vergleich zu 2010 65,7 % weniger Primärrohstoffe in Anspruch.

Der Konsum des Staates und der Nichtstaatlichen Organisationen ist vergleichsweise gering mit 38,9 bzw. 2,8 Millionen Tonnen. Der Rückgang gegenüber 2010 liegt bei 47,6 % bzw. 42,7 %.

Abbildung 33: Der RMC nach Verwendungskategorien, 2010 und in 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD; Werte unter 10 Mio. t werden aufgrund der Lesbarkeit nicht ausgewiesen.

Der Konsum der privaten Haushalte wird in Abbildung 34 entlang der Bedürfnisfelder weiter aufgeschlüsselt. Der größte Anteil der Rohstoffe wird für die Ernährung gebraucht (45,0 %). Für das Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus, das 18,2 % des Konsums der privaten Haushalte ausmacht, zählt das Gastgewerbe, so dass auch in diesem Bedürfnisfeld ein Anteil für Ernährung zu finden ist. Die Ernährung wird von der Biomasse dominiert (85,0 %), abiotische Rohstoffe werden unter anderem für Düngemittel, Haltbarmachung, Zubereitung oder Verpackung der Lebensmittel benötigt. Gegenüber 2010 gehen die Rohstoffaufwendungen für das Bedürfnisfeld Ernährung bzw. Freizeit und Tourismus um 48,5 bzw. 45,9 % zurück.

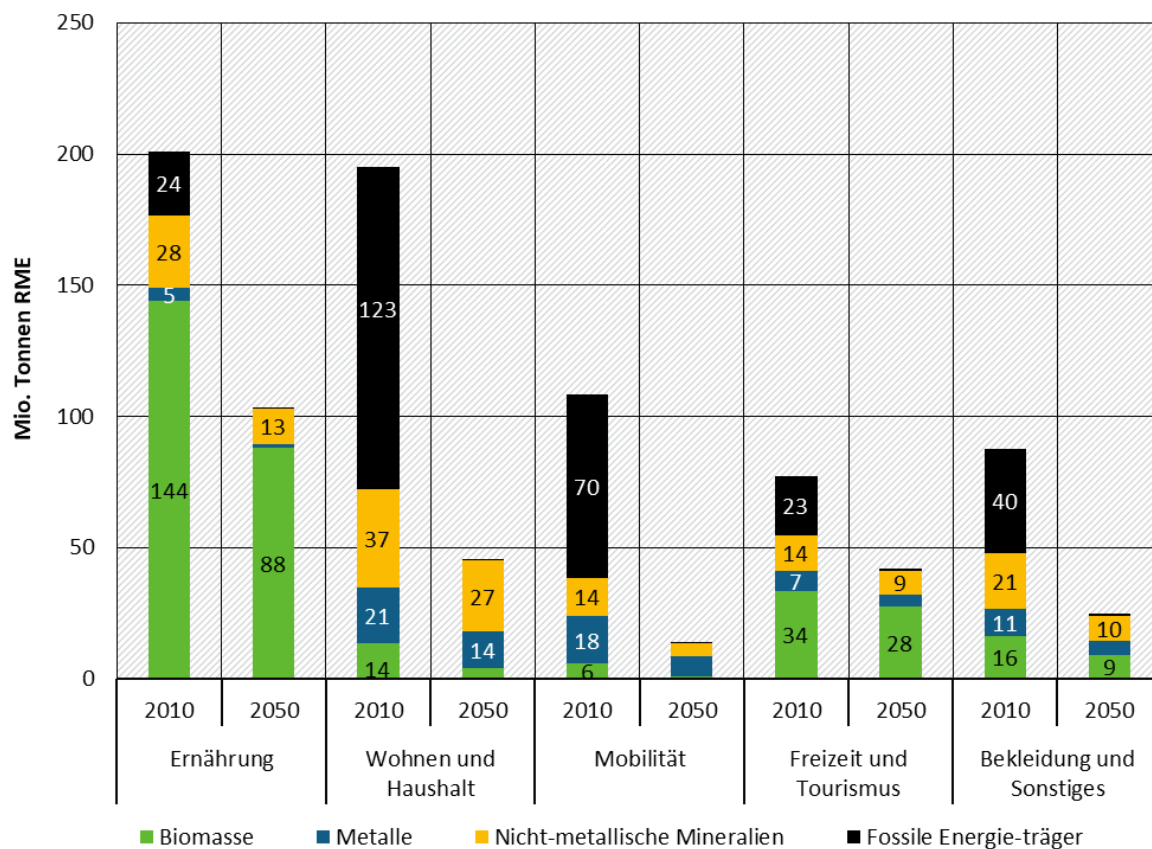
Im Bereich Haushalt und Wohnen werden Rohstoffe nicht nur für Möbel, sondern auch für Reparaturen (z.B. Badsanierung u. ä.) benötigt, wodurch sich der hohe Anteil nicht-metallischer Minerale erklärt. Insgesamt fragen die privaten Haushalte in dieses Bedürfnisfeld 19,9 % ihres Rohstoffkonsums nach. Der Wohnungsbau ist jedoch hier nicht berücksichtigt, da er eine Investition darstellt und dort verortet wird. Der Rückgang gegenüber 2010 liegt bei 76,6 %.

Im Bedürfnisfeld Mobilität konsumieren private Haushalte nur noch 6,1 % ihres gesamten Rohstoffkonsums, beispielsweise für private PKWs oder den öffentlichen Verkehr (die

Verkehrsinfrastruktur ist Teil der Investitionen). Die Rohstoffanspruchnahme für Mobilität geht damit um 87,2 % gegenüber 2010 zurück.

Die Aufwendungen für Kleidung sind gering (0,6 % des privaten Konsums). Dies liegt unter anderem daran, dass synthetische Kleidungsfasern auf der Basis von synthetischen Rohstoffen (Luft, Wasser für PtL) hergestellt werden, die rohstoffseitig per definitionem nicht einberechnet werden. Ferner trägt die Annahme der Technologieübernahme (Rohstoffinputs und Materialeffizienz) der deutschen Bekleidungsindustrie im Rest der Welt zum geringen Materialkonsum für Bekleidung bei. Die Rohstoffaufwendungen für sonstige Produkte (Spielzeug, Instrumente, etc.) liegen bei insgesamt nur noch 25 Mio. Tonnen RME. Gegenüber 2010 beträgt der Rückgang für Bekleidung und sonstige Produkte 71,8 %.

Abbildung 34: Der Konsum der privaten Haushalte nach Bedürfnisfeldern, 2010 und 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG- URMOD; Werte unter 5 werden nicht angezeigt.

Pro Person und Jahr werden damit in den Bedürfnisfeldern

- Ernährung: 1,44 Tonnen
- Wohnen und Haushalt: 0,64 Tonnen
- Mobilität: 0,19 Tonnen
- Freizeit und Tourismus: 0,58 Tonnen und
- Bekleidung und Sonstiges: 0,34 Tonnen (davon 0,08 Tonnen für Bekleidung)

Rohmaterialien konsumiert.

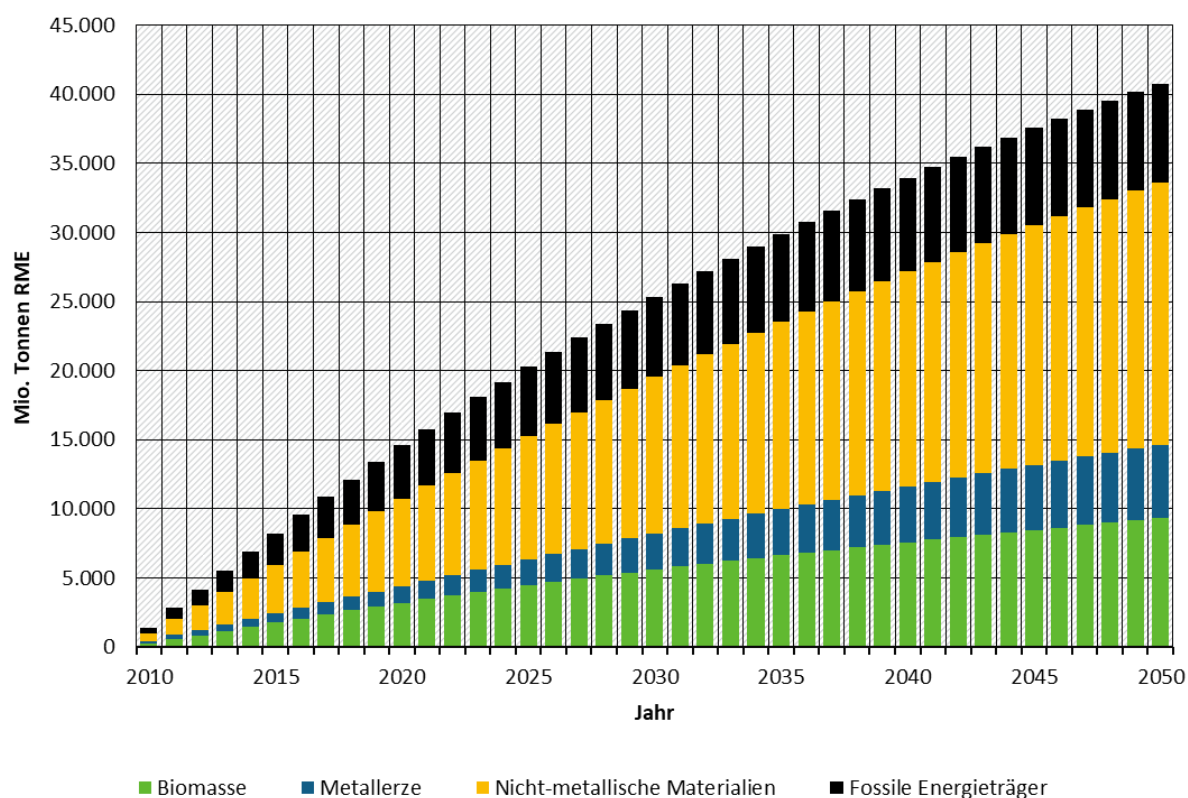
5.3.1.5 Der kumulierte Primärrohstoffkonsum

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen (LIV) auf insgesamt 40,77 Mrd. Tonnen (Abbildung 35). Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (46,5 %), gefolgt von biotischen Materialien (22,8 %) und fossilen Rohstoffen (17,6 %).

25,3 Mrd. Tonnen werden im Zeitraum zwischen 2010 und 2030 konsumiert bzw. investiert. Zwischen 2030 und 2050 summieren sich die Primärrohstoffe auf 15,4 Mrd. Tonnen.

Zur Einordnung der Menge soll der Vergleich mit dem jährlichen Konsum in China und der Welt dienen: In 2017 (aktuell möglichstes Jahr) lag der globale Rohstoffkonsum bei insgesamt 92,065 Mrd. Tonnen und der von China bei insgesamt 35,305 Mrd. Tonnen (UNEP 2016).

Abbildung 35: Kumulierter Primärrohstoffkonsum (LIV), 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.1.6 Substitution von Primärrohstoffen

In GreenLate liegt der Einsatz von Primärrohstoffen (RMC) im Jahre 2050 um insgesamt 771 Mio. Tonnen niedriger als im Jahr 2010.

Zu diesen Einsparungen leistet die Substitution von Primärrohstoffen einen erheblichen Beitrag. Fossile Energieträger werden durch Nutzung immaterieller erneuerbarer Energieträger, wie Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie und Geothermie, sowie durch die energetische Verwertung von Abfällen eingespart. Andere Primärrohstoffe werden in erheblichem Umfang durch die stoffliche Verwertung von Abfällen (Recycling) substituiert.

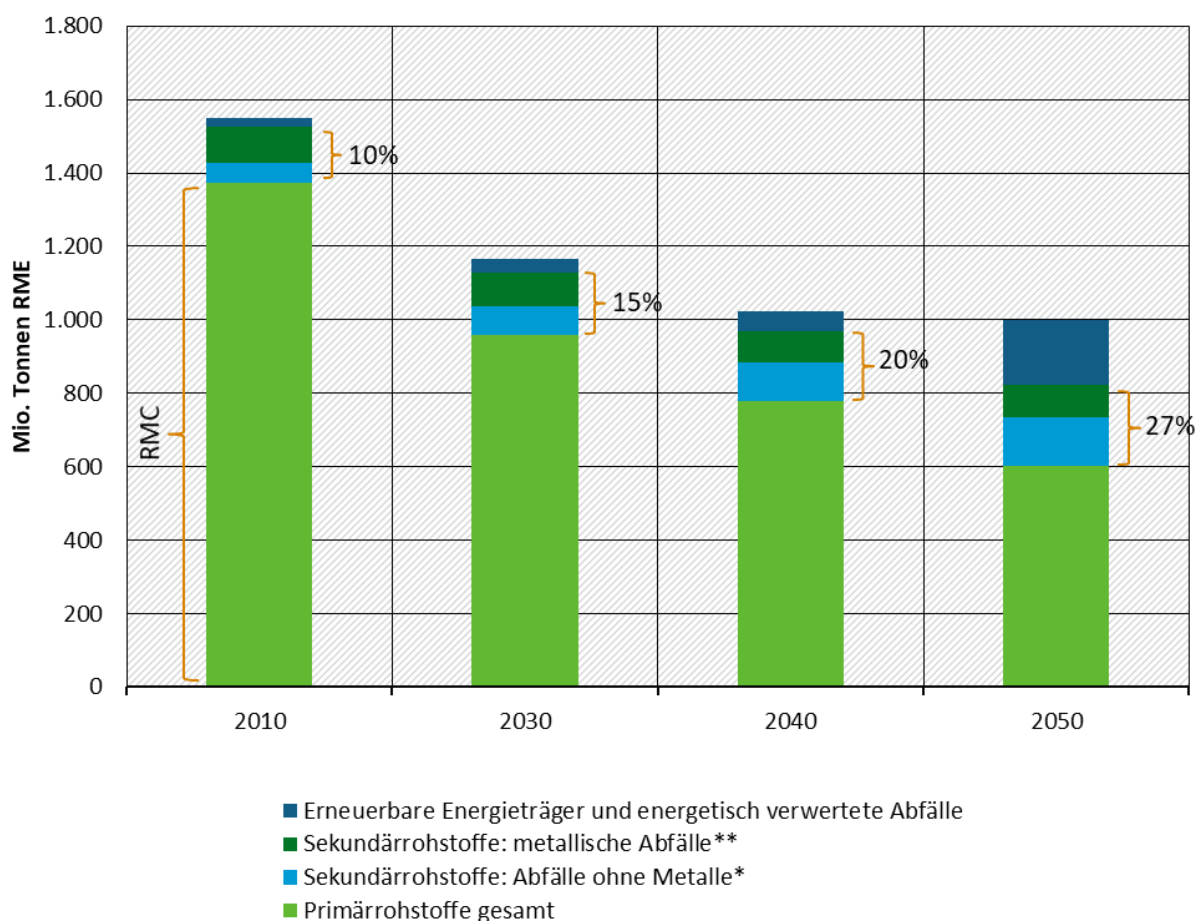
Aufgrund der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe (Recycling) werden im Jahr 2050 Primärrohstoffe in Höhe von 218 Mio. Tonnen eingespart. Diese Abschätzung ist eine Mindestabschätzung, da bei der Berechnung nicht alle stofflich verwerteten Abfälle

vollständig einbezogen werden konnten. Berücksichtigt wurden die in Kapitel 3 bzw. 4 genannten Annahmen zu Eisen, Kupfer, Aluminium, Papier, Altholz und Kunststoffen sowie Sekundärbaustoffen. Im Vergleich zu 2010 werden somit 66 Mio. Tonnen Primärrohstoffe zusätzlich substituiert.

Die Substitution der fossilen Energieträger beläuft sich auf insgesamt 178,7 Mio. Tonnen RME Öläquivalenten, das sind 155 Mio. Tonnen mehr als in 2010.

Abbildung 36 zeigt den Gesamtrohstoffaufwand einschließlich der Primär- und Sekundärrohstoffe sowie der substituierten fossilen Energieträger. Der Anteil der Sekundärrohstoffe (Abfälle) am Gesamtrohstoffaufwand als ein Maß für die Zirkularität der gesamten Volkswirtschaft liegt somit bei 27 % in 2050. Es soll noch einmal betont werden, dass nicht alle Sekundärrohstoffe, insbesondere nicht alle Metalle, in dieser Rechnung einbezogen sind und somit der Anteil der Sekundärrohstoffe insgesamt unterschätzt ist.

Abbildung 36: Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 bis- 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD; *Holz, Papier, Kunststoffe, mineralische Abfälle; ** Eisen-, Kupfer- und Aluminiumschrotte

5.3.2 Rohstoffkonsum ausgewählter Rohstoffe

5.3.2.1 Primär- und Sekundäreinsatz von Eisen, Kupfer und Aluminium

Der Einsatz (in der Abgrenzung des RMC) der primären Basismetalle ist in GreenLate bis 2050 rückläufig (siehe Abbildung 37). Im Gegensatz dazu steigt der Einsatz von Sekundärmetallen. In den folgenden Angaben sind die Im- und Exporte vollständig verrechnet, einschließlich der

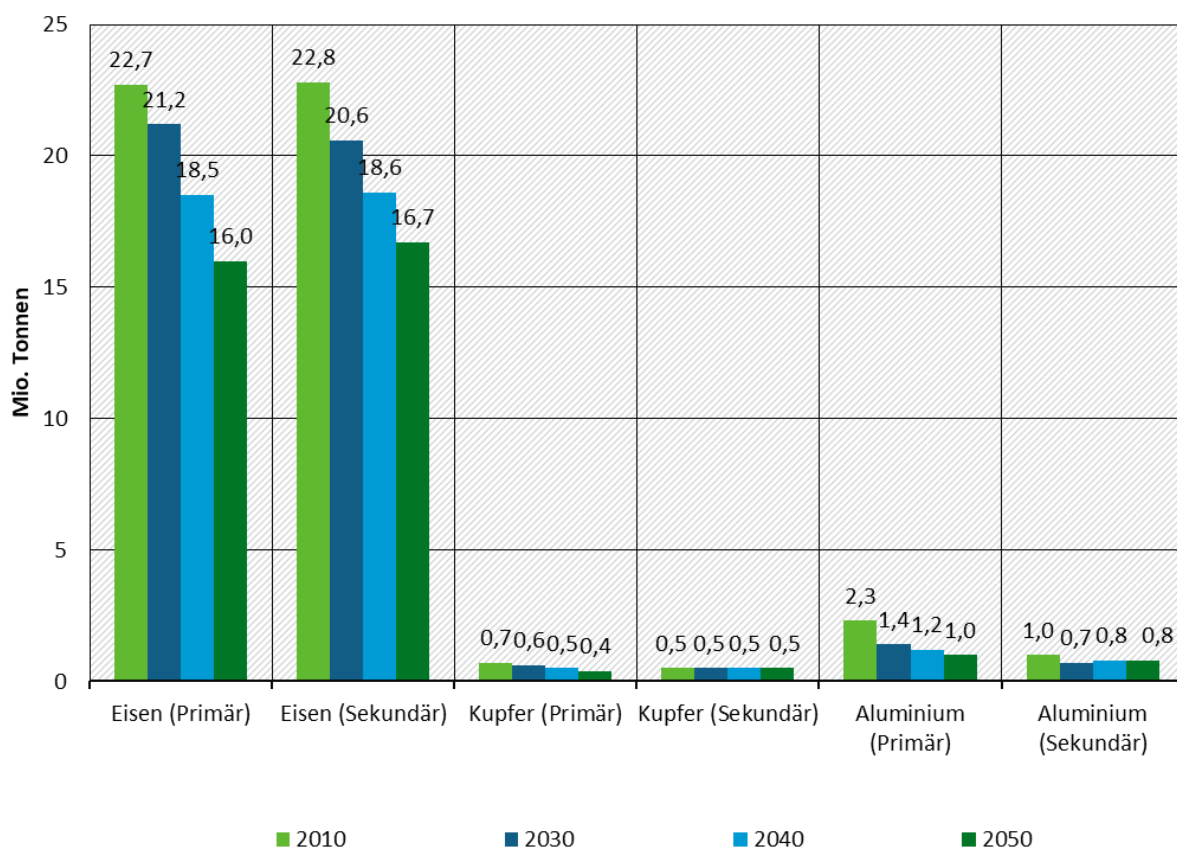
Metallanteile, die sich in Halbwaren und Endprodukten befinden. Die Metalle werden in Metallgehalten ausgedrückt (Abbildung 37).

Sowohl der Primär- als auch der Sekundäreiseneinsatz ist rückläufig. Aufgrund der nur leicht erhöhten Recyclingrate in 2050 gegenüber 2010 verändern sich die Anteile von Primäreisen und Schrotten nur leicht. Konsum und Investitionen erfordern somit in 2050 insgesamt 32,7 Mio. Tonnen Eisen, davon 16 Mio. Tonnen Primäreisen und 16,7 Mio. Tonnen Eisenschrott.

Auch die für Konsum und Investitionen benötigten Mengen Kupfer sind rückläufig. Aufgrund der Annahmen zu steigenden Recyclingraten bleibt im Ergebnis der Kupferschrottanteil nahezu konstant, der Rückgang der gesamten Nachfrage wirkt sich insbesondere auf die nachgefragte Primärkupfermenge aus, die in 2050 nur noch 0,4 Mio. Tonnen Kupfer beträgt.

Etwas anders verläuft die Nachfrage nach Aluminium. Der Rückgang zwischen 2010 und 2030 hat zwei Ursachen: einmal sinkt die Nachfrage ähnlich wie bei den Basismetallen Eisen und Kupfer. Hinzu kommen jedoch auch Unterschiede bei der Produktion und dem Einsatz von Aluminium bei den importierten Vorprodukten aus Europa, die sich als Folge der Annahme, dass sich in europäischen Ländern die Produktionsweisen an die deutsche angleichen, im Falle von Aluminium im Ergebnis niederschlagen. Durch die angenommenen Änderungen der Produktionsweisen in Europa und auch im Rest der Welt sinkt die Aluminiummenge in den Importen. Bis 2050 sinkt die nachgefragte Menge nach Primäraluminium weiter auf 1 Mio. Tonnen, während sich aufgrund der erhöhten Recyclinganstrengungen die Menge an Aluminiumschrotten leicht erhöht. Bemerkenswert ist, dass die Menge des Primäraluminiums im Konsum und in den Investitionen in Deutschland in 2050 immer noch höher als die Menge der Aluminiumschrotte ist. Dies geht auf die (im Vergleich zu Deutschland langsamere) Erhöhung der Recyclingquoten im Ausland zurück.

Abbildung 37: Primär- und Sekundärbasismetallmengen in der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis- 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.2.2 Inanspruchnahme ausgewählter Technologie- und Edelmetalle

Neben den Basismetallen wurde die Nachfrage nach ausgewählten Technologie- und Edelmetallen untersucht.

So wurde die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach Zink, Blei, Platingruppenmetallen, Magnesium, Chrom und Nickel berechnet. Die in Tabelle 55 ausgewiesenen Mengen zeigen die Primärmetallgehalte, die im Konsum und in den Investitionen in Deutschland verbleiben. Der internationale Handel ist vollständig verrechnet. Im Rahmen des Projekts konnten keine Analysen zum Einfluss einzelner Faktoren durchgeführt werden, daher kann keine exakte Aussage zu Gründen der Nachfrageänderung getroffen werden, sondern nur allgemeine Einflussfaktoren genannt werden.

In der überwiegenden Mehrzahl der ausgewählten Metalle ist die Nachfrage (LIV) aus Deutschland rückläufig (Tabelle 55). Verschiedene Faktoren wirken dabei zusammen, darunter die sinkende Nachfrage nach Wohnraum und Gebäude sowie nach nicht-energiebedingten Infrastrukturen aufgrund der rückläufigen Bevölkerung und der rückläufigen Siedlungsneuentwicklung, die ansteigende Effizienz in der Produktion sowie die im Kapitel 3 aufgeführten technologischen Veränderungen. So sinkt die Nachfrage nach Zink, Platingruppenmetallen, Silber, Chrom und Nickel kontinuierlich bis 2050.

Bemerkenswert sind Nachfragetrends, die diese allgemeinen Faktoren nicht widerspiegeln. So wird Blei entsprechend den Technologieannahmen in energierelevanten Infrastrukturen, insbesondere in Tiefseekabeln eingesetzt. Da der Bau der Infrastruktur im Vergleich zu den

anderen Green-Szenarien verzögert, das heißt später durchgeführt wird, steigt die Nachfrage nach diesem Rohstoff in 2040 an, bevor sie danach wieder rückläufig ist.

Tabelle 55: Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050

		2030	2040	2050
Zink	Tsd. t Metallgehalt	391	344	276
Blei	Tsd. t Metallgehalt	113	157	110
Zinn	Tsd. t Metallgehalt	10	11	10
PGM	t Metallgehalt	26	23	21
Silber	t Metallgehalt	298	270	244
Magnesium	Tsd. t Metallgehalt	16	16	16
Chrom	Tsd. t Metallgehalt	77	69	61
Nickel	Tsd. t Metallgehalt	44	37	31

Quelle: ifeu/IEE/SSG – URMOD

Im Rahmen von Sonderrechnungen wurden ferner die nachgefragten Mengen von Siliziummetallen (in PV-Anlagen) sowie von Lithium, Graphit und Kobalt (in Batterien von Pkw, Lkw und leichten Nutzfahrzeugen) berechnet. Die Rohstoffmengen werden in Tabelle 56 ausgewiesen. Diese Rechnungen beinhalten keine Annahmen zu Recyclinganteilen, die ausgewiesenen Mengen können folglich Primär- oder Sekundärrohstoffe sein.

Die Dynamik der nachgefragten Mengen nach Siliziummetallen liegt in der verzögerten Transformation begründet. Erst in 2040 steigt die Nachfrage, dann jedoch auf den sehr hohen Wert von 169 Tausend Tonnen. Die Nachfrage nach Lithium, Graphit und Kobalt ist etwas unterschiedlich: auch hier ist die Nachfrage in 2040 höher als in 2030 aufgrund der langsameren Einführung neuer Technologien, einschließlich dem späteren Markthochlauf der E-Mobilität. Die Entwicklung neuer Batterietechnologien resultiert in 2050 darin, dass Graphit und Kobalt nicht mehr benötigt werden, hingegen Lithium verstärkt nachgefragt wird.

Tabelle 56: Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien

		2030	2040	2050
Siliziummetall¹	t Metallgehalt	52.624	168.709	122.341
Lithium²	t Metallgehalt	1.359	20.343	26.170
Graphit²	t Metallgehalt	21.271	37.933	0
Kobalt²	t Metallgehalt	3.893	6.942	0

Quellen: ¹eigene Berechnungen, ²ifeu/IEE/SSG-TREMOD-Materials

5.3.2.3 Die Inanspruchnahme von Primärholz

Holz wird gegenwärtig sowohl stofflich als auch energetisch genutzt. In GreenLate sinkt der Verbrauch von (Primär-) Holz zwischen 2010 und 2050 [2030/2040] um -55 % [-44 %/-52 %] auf rund 14,7 Mio. Tonnen RME. Auch in diesen Angaben sind die Im- und Exporte miteinander verrechnet.

Verschiedene Gründe sind für den Rückgang verantwortlich. So wird Primärbiomasse ab 2030 nicht mehr für energetische Zwecke genutzt, dies reduziert die Primärholzmenge signifikant. Weiterhin steigt, wenn auch nicht so stark wie in den anderen Green-Szenarien, die effiziente

Verwendung von Papier und Pappe, auch dies senkt die nachgefragte Menge nach Holz. In 2050 liegt der Bedarf an Holz, trotz geringerem Holzbauanteil, um 10,3 % höher als beispielsweise in GreenEe1, was im Wesentlichen auf die niedrigere Steigerung der Materialeffizienz zurückgeht.

5.3.2.4 Die Inanspruchnahme von Sand, Kies und Schotter

Sand und Kies und Schotter wird im Wesentlichen im Hoch- und Tiefbau eingesetzt, bei der Herstellung von Beton, im Unterbau von Fundamenten, Straßen, Wegen oder Gleistrassen oder auch als Füllmaterial. Sand, Kies und Schotter sind Massenrohstoffe, fast ein Drittel des gesamtdeutschen Rohstoffkonsums geht auf den Verbrauch von dieser Rohstoffgruppe zurück. Gleichzeitig ist die konkrete Mengenangabe mit Unsicherheiten behaftet, da die empirischen Daten nicht ausreichen erfasst werden.

Im GreenLate-Szenario sinkt der Verbrauch bis 2050 auf 245 Mio. Tonnen, dies ist ein Rückgang um 45,1 % gegenüber 2010. Der Rückgang verläuft relativ stetig mit 15 % bis 2030 und 30 % bis 2040. Wesentliche Gründe für den Rückgang sind die rückläufige Bautätigkeit im Hochbau und im Tiefbau, insbesondere auf kommunaler Ebene (Straßen und Versorgungsinfrastrukturen) in Folge der rückläufigen Siedlungsentwicklung. Im Vergleich zu GreenEe1 beispielsweise wird 6,8 % mehr Sand, Kies und Schotter in 2050 gebraucht.

5.3.2.5 Mögliche Knappheit von Rohstoffen

Rohstoffe gelten als knapp, wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt. Man kann zwischen einer temporären Knappheit und einer absoluten Knappheit unterscheiden. Temporär knapp kann ein Rohstoff sein, wenn zwar ausreichend Rohstoffe in der Erdkruste vorkommen, jedoch die abgebaute Menge unter der nachgefragten Menge liegt. Absolut knapp kann ein Rohstoff sein, wenn die nachgefragte Menge über der Menge liegt, die in der Erdkruste vorkommt. Hierbei können Reserven und Ressourcen weiter unterschieden werden: Reserven sind die Rohstoffmengen, die unter den bekannten technisch-ökonomischen Bedingungen abbaubar sind, Ressourcen sind die Mengen, die geologisch in der Erdkruste vorkommen (siehe bspw. Frondel et al. 2006; USGS 2020). Das heißt, Hinweise auf eine mögliche zukünftige Knappheit von Rohstoffen geben Vergleiche der nachgefragten Mengen mit (aktuellen) Produktionsmengen, Reserven und Ressourcen.

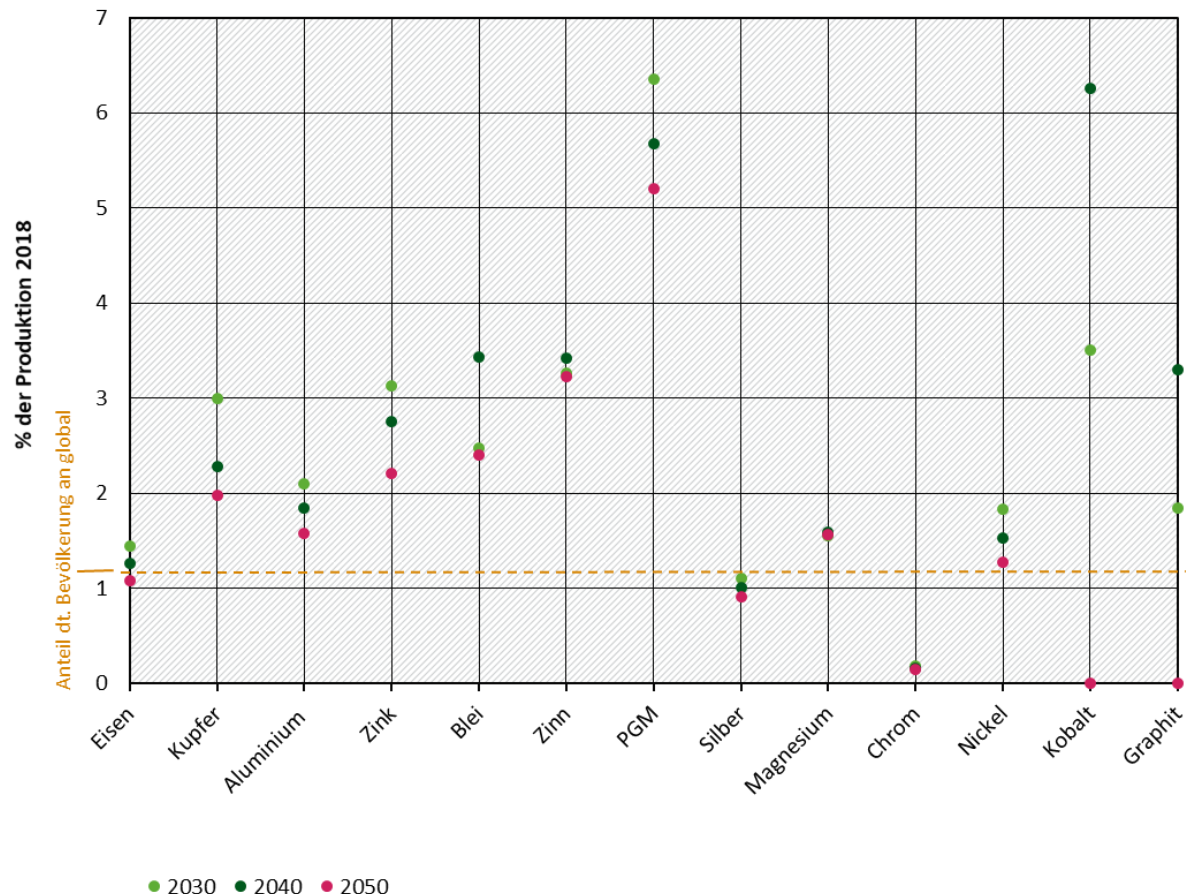
Es sei angemerkt, dass im Projekt RESCUE Szenarien gerechnet und keine Prognosen erstellt werden. Alle RESCUE-Szenarien gehen von einer sehr optimistischen Transformation im Rest der Welt aus. Dies bedeutet, dass implizit unterstellt wird, dass Menschen außerhalb Deutschlands (nahezu exakt oder um zehn Jahre verzögert) dieselben Technologien einsetzen und dieselbe Nachfrage nach Rohstoffen wie die Menschen in Deutschland haben. Daher ist der Vergleich der Nachfrage pro-Kopf-Mengen mit den Produktionsmengen bzw. der Vergleich der kumulierten Nachfragemengen mit Reserven bzw. Ressourcen in diesem Fall sinnvoll, um Hinweise auf eine potenzielle, zukünftige Knappheit unter den Szenarioannahmen zu erhalten. Eine Prognose – was RESCUE nicht ist – würde wahrscheinliche Entwicklungen z.B. bezüglich Technologieänderungen oder Reaktionen des Marktes einbeziehen.

Abbildung 38 zeigt den Vergleich der von Deutschland im Zuge der Transformation in GreenLate ermittelten nachgefragten Mengen als Anteil an der globalen Produktion in 2018. Der Anteil der deutschen Bevölkerung an der globalen Bevölkerung kann als Referenz zur Einordnung der Nachfragemenge dienen.

Die von Deutschland nachgefragten Mengen nach Chrom und Silber liegen unter oder etwa im Rahmen der Referenz. Das heißt, die von Deutschland nachgefragte Menge ist, verglichen mit der heutigen Produktion, unterproportional bzw. entspricht dem Bevölkerungsanteil.

Im Pfad, jedoch nicht mehr in 2050, wird Eisen, Kobalt und Graphit überproportional von Deutschen nachgefragt. In allen Jahren fragt Deutschland einen überproportionalen Anteil nach Kupfer, Aluminium, Zink, Blei, Zinn, PGM, Nickel, Magnesium und Lithium nach. Dieses Übermaß ist bei Lithium besonders stark ausgeprägt, die nachgefragte Menge entspricht 4,9 - 72,7 - 93,5 % der Produktionsmenge (ohne USA) in 2018, sie ist in der Abbildung nicht enthalten. Die Nachfrage nach Lithium, Graphit, Siliziummetall und Kobalt wurden ohne die Berücksichtigung von Recyclingmengen gerechnet. Der Aufbau bzw. die Weiterentwicklung von Recyclingsystemen kann die Nachfrage nach diesen Rohstoffen signifikant mindern.

Abbildung 38: Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD und (USGS 2020); der Vergleich in dieser Graphik wurde – abweichend von der RESCUE-Studie von (UBA 2019a) – auf der Basis von Extraktionsdaten aus 2018 vorgenommen.

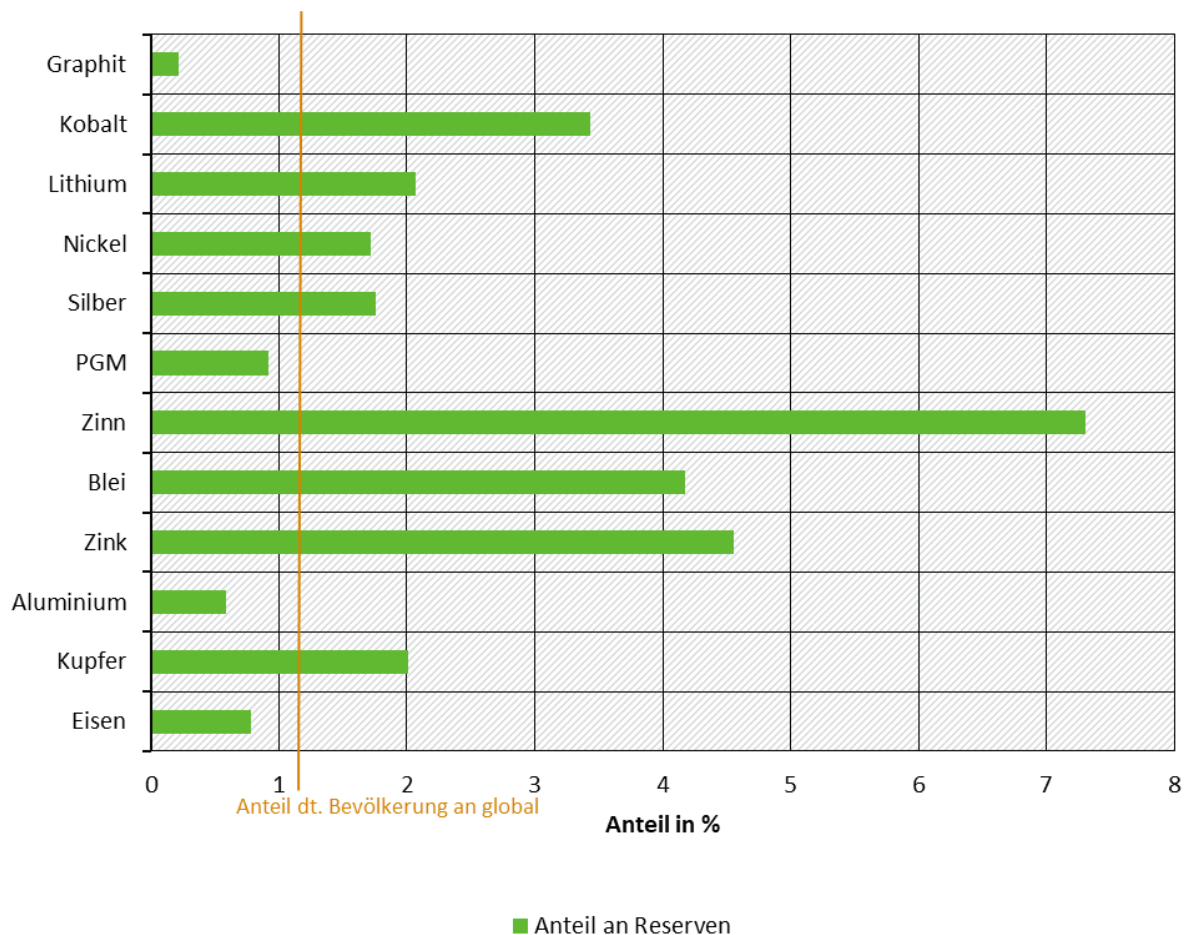
Da Bergbauunternehmen auf eine steigende Nachfrage reagieren und Produktionskapazitäten erhöhen, ist der Vergleich der kumulierten Nachfrage im Vergleich zu den Reserven interessant, um weitere Hinweise auf eine mögliche Knappheit von Rohstoffen zu erhalten. Der Vergleich berücksichtigt keine technologische Weiterentwicklung der Förderung. Für manche Rohstoffe, darunter Siliziummetalle und Magnesium, verweist (USGS 2020) auf ausreichende Vorkommen und weist keine Reserven aus. Für diese Rohstoffe ist, bei Ausweitung der Produktionsmengen, unter den Szenario-Annahmen folglich kein Versorgungsengpass zu erwarten.

Die kumulierte Nachfrage nach Eisen, Aluminium, Graphit und PGM bleibt unterhalb eines Anteils von 1,1 %, was dem Anteil der deutschen Bevölkerung an der globalen Bevölkerung entspricht und als eine Referenz zur Einordnung der Nachfrage genutzt werden kann (Abbildung 39). Für Kupfer, Nickel, Silber, Zinn, Blei, Lithium, Kobalt und Zink liegt die

kumulierte Nachfrage über der Referenz, was unter den Szenario-Annahmen als ein Hinweis auf mögliche Versorgungsengpässe interpretiert werden kann. Mögliche Versorgungsengpässe können umgangen werden, wenn die Nachfrage gesenkt wird, beispielsweise, wenn andere Technologien oder Substitute (einschließlich Sekundärmaterialien) genutzt werden, oder wenn das Angebot aufgrund des Einsatzes von besseren Technologien erhöht werden kann.

An diesem Punkt können die kumulierten Mengen weiterhin mit den Ressourcen, also den Mengen, die in der Erdkruste vorkommen, aber noch nicht wirtschaftlich/technologisch abbaubar sind, mit den kumuliert nachgefragten Mengen in Deutschland verglichen werden. Es zeigt sich, dass nur noch bei den Rohstoffen Nickel und Kupfer die kumuliert nachgefragten Mengen über 1 % der (bekannten) Ressourcen liegen.

Abbildung 39: Kumulierte Nachfrage ausgewählter Rohstoffe als Anteil der Reserven in 2018



Quelle: eigene Darstellung und Berechnung auf der Basis der Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG -URMOD und von USGS (2020)

5.3.2.6 Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe1

Die verzögerte Transformation in GreenLate führt im Vergleich zur Transformation in GreenEe zu einem höheren Rohstoffkonsum. In 2050 [2030/2040] liegt der RMC 11,6 % [4,9/9,7] höher als in GreenEe (Tabelle 57). Der Unterschied ist bei den fossilen Rohstoffen und bei den Metallerzen besonders ausgeprägt. In Folge des höheren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 um 11,6 % höher als bei GreenEe. Die zwischen 2010 und 2050 kumulierte Nachfrage nach Primärrohstoffen ist in GreenLate 4,1 % höher als in GreenEe.

Tabelle 57: RMC in GreenLate und GreenEe1 im Vergleich

	GreenLate			GreenEe1			GreenLate ggü. GreenEe in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
RMC gesamt	959.579	778.887	603.268	914.988	709.968	540.364	4,9	9,7	11,6
Biomasse	211.647	184.685	163.183	210.440	181.389	159.032	0,6	1,8	2,6
Metallerze	156.402	135.682	123.499	142.723	110.321	84.347	9,6	23,0	46,4
Nicht- metallische Minerale	465.282	385.162	308.442	451.833	374.998	291.050	3,0	2,7	6,0
Fossile Rohstoffe	126.249	73.358	8.144	109.992	43.261	5.934	14,8	69,6	37,2

Quelle: ifeu/IEE/SSG - URMOD

In GreenLate werden insbesondere eine Vielzahl von Metallen sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer höheren Menge als in GreenEe1 nachgefragt. In Folge sind bei einer späten Transformation Versorgungsengpässe bei einer höheren Anzahl von Rohstoffen zu erwarten, allerdings zeigt sich dies teilweise erst später. So ist in 2030 aufgrund der späten Umstellung die (anteilig-deutsche) Nachfrage nach Siliziummetallen noch gering. Dies ist in GreenEe1 anders, hier ist bereits in 2030 ein Versorgungsengpass zu erwarten, sofern die Produktionsmengen nicht ausgeweitet werden und alle Menschen Mengen wie in Deutschland nachfragen. In 2050 sind bei neun der untersuchten Rohstoffe (Kupfer, Aluminium, Blei, Zinn, PGM, Magnesium, Nickel, Lithium und Siliziummetall) Versorgungsengpässe unter den genannten Bedingungen in GreenLate zu erwarten, in GreenEe1 ist dies nur bei fünf Rohstoffen (Zinn, PGM, Magnesium, Lithium, Silizium) der Fall.

Der von Deutschland bis 2050 nachgefragte Anteil an den gegenwärtig bekannten Reserven liegt in GreenLate bei den meisten Metallen höher als in GreenEe1. So liegt der kumuliert nachgefragte Anteil nach Kupfer bei 2,76 versus 2,41 % und nach Lithium 2,07 versus 1,99 %. Ausnahmen sind Kobalt und Graphit, die aufgrund der späteren Transformation insgesamt weniger nachgefragt werden als in GreenEe1.

5.4 Flächennutzung

Bis 2050 verändert sich die Flächennutzung in Deutschland. Die Entwicklungen der Flächennutzungen folgen unterschiedlichen Trends.

Auch wenn die Siedlungsneuentwicklung rückläufig ist und infolge dessen die Flächenneuversiegelung sinkt, so steigt doch die Neuinanspruchnahme von Fläche für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie für Verkehrs- und Erholungsflächen weiter an. Im Gegensatz dazu sinkt die Betriebsfläche aufgrund der rückläufigen Rohstoffextraktion in Deutschland. Insgesamt steigt die Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 53.225 km² an, dies entspricht 14,9 % der gesamten Bodenfläche Deutschlands (Tabelle 58).

Die Acker- und Grünlandfläche sinkt aufgrund der Umwandlung in Siedlungsflächen auf insgesamt 150.556 km². Die Waldfläche wurde von den WEHAM-Szenarien (Naturschutzpräferenzszenario) übernommen. In Folge der Annahmen zur Rückvernässung steigen wiedervernässte Flächen auf 10.093 km² an. Vegetationsflächen nehmen somit insgesamt 82,8 % der Gesamtfläche in 2050 ein.

Die Flächenbelegung durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (Freiflächen-PV und WEA-on-shore) liegt in 2050 bei insgesamt 1.894 km². Diese Fläche beinhaltet die versiegelten und

überschirmten Flächen sowie Zwischenflächen und Flächen für den Kranstellplatz und Zuwegung. Dies entspricht 0,7 % der Gesamtfläche Deutschlands. Nicht zu verwechseln ist dies mit der Diskussion zu der notwendigen Ausweisung von mindestens 2 % der Landesfläche für den Ausbau von Wind-Onshore, welche durch die Abstände zwischen einzelnen Windkraftanlagen in einem Windpark aufgrund von Abschattungseffekten bestimmt wird.

Tabelle 58: Flächennutzung in Deutschland in 2030, 2040 und 2050

	2010 ¹	2030 ²	2040 ²	2050 ²	Quelle
Bodenfläche TOTAL [km²]	357.127	357.582*	357.582	357.582	Destatis, Fortschreibung 2017
SIEDLUNG und Verkehrsfläche	51.291	52.912	53.224	53.255	Eigene Berechnung
Wohnbau, Industrie/Gewerbe, Erholung, sonst. Siedlungsflächen	30.901	32.156	32.492	32.596	Eigene Berechnung
Betriebsfläche	2.459	2.209	1.991	1.858	Eigene Berechnung auf der Basis von URMOD
Verkehr	17.931	18.547	18.740	18.801	Eigene Berechnung
VEGETATION (Abgrenzung Destatis) einschl. UNLAND	297.279	296.454	296.143	296.111	
Landwirtschaft	162.080	153.913	151.168	150.556	ALMOD
davon Acker	115.140	112.723	111.515	111.515	ALMOD
davon Grünland	44.440	39.708	37.341	37.341	ALMOD
Flächenstilllegung	2.500	1.482	2.311	1.700	ALMOD
Wald	107.664	106.190	106.250	106.360	WEHAM
Sonstige Vegetation	27.535	36.351	38.725	39.195	Eigene Berechnung (Differenz)
davon Moor und Sumpf	929	1.186	1.186	1.186	Destatis, Wert von 2017 fortgeschrieben
davon wiedervernässte Flächen (ab 2030)		5.551	10.093	10.093	Annahme LULUCF
<i>Bergbaufolgefläche</i>		399	617	750	<i>Eigene Berechnung auf der Basis von URMOD</i>
GEWÄSSER	8.557	8.215	8.215	8.215	Wert von Destatis 2017 fortgeschrieben
Nachrichtlich: Fläche für EE	121	627	1.147	1.894	
Fläche für PV-Freifläche	89	514	1.042	1.714	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)
Fläche für WEA - onshore	32	112	105	180	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)

Quellen: ¹Destatis (2018b), ²Quellen: siehe rechte Spalte

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

GreenLate beschreibt einen Transformationspfad, der spät beginnt, weniger innovativ ist als andere Green-Szenarien und in dem in 2050 viele Umstellungen auf post-fossile Technologien noch nicht vollzogen sind. Fossile Rohstoffe müssen daher durch synthetische Rohstoffe ersetzt werden. 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 ein Szenario der geringen „Elektrifizierung“ und des „verspäteten Handelns“ bei Innovationen und Umsetzung dar.

Bezüglich der **Treibhausgas**minderung liegt GreenLate am ambitionierten Rand des Zielkorridors der Bundesregierung, also Minderung um 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und 95 % bis 2050. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass auch bei einer vergleichsweise späten und weniger ambitionierten Transformation ein Rückgang der Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990 erreichbar ist bei einem gleichzeitigen Rückgang der Nachfrage nach Rohstoffen. Allerdings entstehen in GreenLate höhere Umweltbelastungen als in den anderen Green-Szenarien. Und insbesondere in der hohen Importabhängigkeit von PtG/L, den sehr hohen absoluten PtG/L-Importen und den dafür notwendigen Marktwachstumsraten, stellt sich die Frage inwiefern diese Überlegungen eher theoretisch oder auch realisierbar sind.

Aufgrund der späteren und langsameren Transformation entstehen im GreenLate-Szenario mehr Treibhausgas-Emissionen als in den Treibhausgasemissionen. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 17,6 % [13,5 %/48,9 %] mehr Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1 (Tabelle 53). Der relevanteste Unterschied mit 44 bzw. 95 Mio. Tonnen CO_{2Äq} in 2030 bzw. 2040 ist in der Quellgruppe Energie (ohne Verkehr) zu finden. Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenLate um 2,145 Mrd. Tonnen (4,9 %) höher als in GreenEe1. Die späte und weniger innovative Transformation führt zu (im Vergleich zu GreenEe1) hohen Treibhausgasemissionen, die sich bis 2050 kumulieren. Das heißt, die Begrenzung des globalen Temperaturanstieges auf (deutlich) unter 2° ist unsicherer als in den anderen Szenarien. Da die kumulierten Treibhausgase in GreenLate besonders in den anstehenden Jahren (bis 2030) zunehmen, ist schneller mit Temperaturanstiegen und allen daraus resultierenden Konsequenzen zu rechnen. Dies hat Folgen für den Handlungsspielraum für Deutschlands und für andere Staaten. Fehler oder unzureichende Umsetzungen in der Klimapolitik können weniger leicht (als beispielsweise in anderen Green-Szenarien) korrigiert werden.

Der Bereich **LULUCF (ohne Wald) und Landwirtschaft** spiegelt das szenariospezifische geringere Ambitionsniveau zu Beginn des Pfades wieder. Im Szenario GreenLate entstehen wegen der verspäteten Wiedervernässungsmaßnahmen höhere THG-Emissionen bei den organischen Böden bis 2030 im Vergleich zu den anderen GreenEe-Szenarien. Auch die Umstrukturierung der Landwirtschaft hin zu einer emissionsarmen, modernen und nachhaltigen Landwirtschaft erfolgt verzögert. Tierbestände werden im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien geringer und später reduziert. Technische Treibhausgasminderungsmaßnahmen, wie reduzierter Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement werden zu Beginn nur langsam und dann größtenteils schneller umgesetzt. Doch selbst GreenLate erreicht mit 60,95 Mio. t CO_{2Äq} die geforderten Minderungen der Landwirtschaft bis 2030.

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.

Aus dem Vergleich mit GreenEe1 wird deutlich, dass eine deutlich höhere nationale Stromerzeugung notwendig wird (langfristig + 135 TWh). Zusätzlich nimmt Gas aufgrund des verzögerten Ausbaus der erneuerbaren Energien eine stärkere Rolle als Brückentechnologie in der Stromerzeugung ein. Aus dem Vergleich des Stromverbrauchs wird deutlich, dass aufgrund der geringeren Effizienz über alle Anwendungsbereiche hinweg eine höhere direkte Stromnachfrage resultiert (z.B. herkömmlicher Verbrauch, PtH, WP, E-Mobilität ohne OH-Lkw). Dagegen wird die höhere PtG/PtL-Nachfrage in GreenLate nicht durch eine höhere nationale Erzeugung gedeckt, sondern durch Importe. Aus dem Vergleich mit GreenEe1 wird deutlich, dass es langfristig insbesondere mehr Wind-Onshore (+22 GW) und mehr PV (+45 GW) braucht um die höhere nationale direkte Stromnachfrage decken zu können.

Ein höherer Ausbau der erneuerbaren Energien führt zu mehr Stromspitzen die ineffizienter direkt elektrisch zur Wärmeerzeugung genutzt werden. Zur Deckung der Fernwärme werden mehr frei verfügbare moderne KWK-Solarthermie-Netze mit langfristig hohen Deckungsanteilen von PtH (Elektrodenkesseln) ausgebaut (langfristig 9,8 % im Vergleich zu GreenEe1 mit 1,9 %). In der Optimierung der dezentralen Gebäudeversorgung wird das langfristige Potenzial für Erdsonden in 2050 nicht ausgeschöpft. Aus Wirtschaftlichkeitsgründen in Rückkopplung mit dem Stromsystem werden zwischenzeitlich mehr Luft-WP als Erdsonden-WP ausgebaut. Langfristig ist der Erdsonden-Anteil zwar wieder höher als von Luft-WP, aber im Vergleich zu anderen GreenEe-Szenarien weist GreenLate eine generelle Verschiebung zu Luft-WP auf.

Durch den Ausstieg aus der Kohleversorgung, verblieben neben Strom und Holz und anderen Reststoffe insbesondere Gase und Kraftstoffe als Energieträger. Dabei wird neben dem grundsätzlich hohen Verbrauchsniveau insbesondere 2040 der noch stagnierende fossile Erdgasverbrauch deutlich, der in Verbindung mit PtG/PtL-Importen zu einem zwischenzeitlich steigenden Gas- und Kraftstoffverbrauch führt. Im Vergleich zu GreenEe 1 wird der insgesamt höhere Brennstoffbedarf deutlich (+308 TWh in 2050), welche über PtG/PtL-Importe gedeckt wird (+62 % in 2050). Im Gegensatz zu GreenEe1 wurde eine 50 %-ige Überbauung statt 15 % unterstellt. Entsprechend ergibt sich für die Jahre 2030 und 2040 eine geringere relative Importmenge. Dennoch sind aufgrund der langfristig hohen PtG/PtL-Nachfrage auch die absoluten Importmengen in 2030 und 2040 größer als in allen anderen Green-Szenarien.

Die wesentlichen Unterschiede im **Energiebereich** liegen in vier Bereichen:

- ▶ Zwischenzeitliche Überkapazitäten im jährlichen Absatzmarkt für PV, um langfristig sehr hohe Ausbautzahlen aufgrund des höheren Stromverbrauchs erreichen zu können.
- ▶ Höherer Gebäudewärmebedarf aufgrund geringerer Sanierungsrate und -tiefe und höherer Wohnfläche. Langsamerer Austausch von fossilen Bestandskessel und Verbleib von Gaskessel in unsanierten Gebäuden in 2050. Geringerer Anteil Wärmepumpen generell und diese weisen zusätzlich eine schlechtere Effizienz auf. Langsamerer Ausbau von Fernwärme und langfristig geringere relative erneuerbare Energien-Wärmepotenziale (aufgrund der höheren absoluten Wärmenachfrage) zu deren Versorgung.

- ▶ Höheres Verkehrsaufkommen, geringere Effizienzentwicklung in Antriebstechnologien, geringere Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene. Geringere Durchdringung mit Elektromobilität und keine Einführung einer Oberleitungs-Infrastruktur für den Straßengüterverkehr. Und folglich deutlich höherer Bedarf an Kraftstoffen (PtL).
- ▶ Zwischenzeitliche sehr hohe Überkapazitäten für den Aufbau einer PtG/PtL-Importinfrastruktur um trotz eines verzögerten Markthochlaufs langfristig sehr hohe Ausbauzahlen aufgrund des deutlich höheren Kraftstoffbedarfs erreichen zu können.

Der **Gebäudewärmebereich** wird von einem deutlich niedrigeren Ambitionsniveau gekennzeichnet. Dies spiegelt sich in allen Bereichen nieder, wie einem höherem Pro-Kopf-Wohnflächenverbrauch, geringerer Sanierungsrate und tiefe, geringerer Durchdringung von Flächenheizungen und einer verspäteten Durchdringung von Wärmepumpen und Fernwärme. Obwohl die Anzahl der Wärmepumpen geringer ist, ist der langfristige Stromverbrauch von dezentralen Wärmepumpen und Wärmepumpen und Elektrodenkesseln in der Fernwärme aufgrund des höheren Wärmebedarfs und der Ineffizienz deutlich höher als in GreenEe1. Zusätzlich verbleiben auch langfristig Gaskessel in unsanierten Bestandsgebäuden wodurch der Endenergieverbrauch zusätzlich deutlich höher ausfällt. Bis 2035 erreicht auch das GreenLate-Szenario trotz eines vollständigen Ausstiegspfadens aus der dezentralen Biomassenutzung die sektoralen Treibhausgasmininderungen für 2030.

Im **Verkehrsbereich** wird aus dem Vergleich zunächst deutlich, dass sowohl nationaler als auch internationaler Verkehr in GreenLate deutlich mehr Endenergie benötigen als in GreenEe1. Der nationale Verkehr benötigt zwischen 20 % (2030) und 41 % mehr Endenergie, der internationale Verkehr 18 % bis 46 %. Da in GreenLate die Flottenumschichtung zu Elektro-Pkw deutlich zeitverzögert ggü. GreenEe1 ist und im Straßengüterverkehr zudem keine Elektromobilität in signifikantem Umfang angenommen wird, ist der prozentuale Anteil von Strom am Endenergieverbrauch in GreenLate deutlich niedriger als in GreenEe1. In den Jahren 2030 und 2040 ist der Stromverbrauch in GreenLate auch in absoluten Zahlen niedriger als in GreenEe1. Im Jahr 2050 dagegen ist der Stromverbrauch in beiden Szenarien etwa gleich hoch, da niedrigere Elektromobilität einerseits und insgesamt höhere Verkehrsaufkommen und Endenergieverbräuche andererseits einander nahezu ausgleichen. Dementsprechend ist der verbleibende Kraftstoffbedarf für den nationalen Verkehr im Jahr 2050 in GreenLate knapp doppelt so hoch wie in GreenEe1. In Summe für den nationalen und internationalen Verkehr ist der Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 in GreenLate um 70 % höher gegenüber GreenEe1. GreenLate kann erst nach 2035 das sektorale Ziel des Klimaschutzplanes für das Jahr 2030 im Verkehr erreichen.

Die Transformation in GreenLate führt zu einer Reduktion des **Rohstoffkonsums** (RMC) um 56,1 % gegenüber 2010 auf insgesamt 603,3 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente. Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die um 97,8 % zurückgehen. Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (-67,3 %). Im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 weiterhin fossilen Energieträger verwendet, dies spiegelt sich in den fossilen Rohstoffen der letzten inländischen Verwendung (RMC) wider. Der RMC für nichtmetallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 45,0 %. Der drittstärkste Rückgang bis 2050 (-38,5 %) ist bei der Biomasse zu verzeichnen. Der Rückgang des RMC verläuft nur bei den fossilen Rohstoffen sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 218 Mio. Tonnen Primärrohstoffe in 2050 eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 27 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe1 führt die langsame Transformation in GreenLate zu einem höheren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 11,6 % höher als in GreenEe1. Der Unterschied ist in 2050 bei den Metallerzen besonders ausgeprägt. In Folge des höheren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person mit 8,4 Tonnen in 2050 um 11,6 % höher als in GreenEe. Dies ist eine Reduktion um 50,1 % gegenüber 2010. Der Konsum von Lebensmitteln stellt dabei den größten Anteil des Konsums der privaten Haushalte in 2050, während die Rohstoffaufwendungen für Mobilität, Wohnen und Freizeit signifikant sinken. Trotz Reduktion der absoluten Rohstoffmengen bleiben die Rohstoffaufwendungen für die Unterhaltung und Erneuerung der bestehenden Gebäude- und Infrastrukturen weiterhin vergleichsweise hoch.

Die Nachfrage nach der Mehrzahl der untersuchten Rohstoffe ist rückläufig; Ausnahmen sind Rohstoffe, die im Zuge der Transformation für Schlüsseltechnologien erforderlich sind. In GreenLate werden eine Vielzahl von Metallen sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer höheren Menge als in GreenEe1 nachgefragt. Die Nachfrage steigt im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien später an. So ist in 2030 aufgrund der späten Umstellung die (anteilig-deutsche) Nachfrage nach Lithium noch gering. Dies ist in GreenEe1 anders, hier ist bereits die von Deutschland nachgefragte Menge bereits in 2030 überproportional hoch. Verglichen mit den heutigen Produktionsmengen liegt die deutsche Nachfrage in 2050 nach Kupfer, Zink, Blei, Zinn, PGM, Nickel, Magnesium und Lithium überproportional hoch, gemessen am Anteil der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung

GreenLate zeichnet damit einen 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 für die Klimaschutzziele 2050 mit sich bringt.

7 Quellenverzeichnis

Bazanella, A. M.; Ausfelder, F. (2017): Low carbon energy and feedstock for the European Chemical Industry. Dechema, Frankfurt.

BMU (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf (28.07.2020).

BMUB (2016a): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung.

BMUB (2016b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf (28.07.2020).

BMW i (2015): Energieeffizienz- strategie Gebäude. Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand.

Bundesregierung (2018): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Aktualisierung 2018.
<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1546450/65089964ed4a2ab07ca8a4919e09e0af/2018-11-07-aktualisierung-dns-2018-data.pdf> (28.07.2020).

Deilmann, C.; Reichenbach, J.; Krauß, N.; Gruhler, K. (2017): Materialströme im Hochbau - Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Bonn/Dresden.

Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsberechnung.

Destatis (2018a): Umweltökonomische Gesamtrechnungen Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. Vol. 49, No.0.

Destatis (2018b): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1 - 2017. Vol. 49, No.0.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Sonja, L.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. Climate Change 01/2020.

Fronzel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Vance, C.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M. (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. BGR, Fraunhofer ISI, RWI Essen.

IMO (2014): Third IMO GHG Study. In: *International Maritime Organization*.

Kauertz, B.; Franke, B.; Dittrich, M.; Fehrenbach, H. (n.d.): Ableitung eines Indikatorensets zur Umweltverträglichkeit der Energiewende (unveröffentlicht). UBA-Projekt: FKZ 3715 43 101 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Knappe, F.; Reinhardt, J.; Bergmann, T.; Mottschall, M. (2015): Substitution von Primärrohstoffen im Straßen- und Wegebau durch mineralische Abfälle und Bodenaushub; Stoffströme und Potenziale unter Berücksichtigung von Neu-, Aus- und Rückbau sowie der Instandsetzung Heidelberg. im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Mellwig, P.; Jochum, P.; Pehnt, M.; Lempik, J.; von Oehsen, A.; Böttcher, S.; Blömer, S.; Stelter, D.; Hertle, H.; Krenz, T. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich - Kurztitel : Anlagenpotenzial. ifeu Heidelberg, Beuth Hochschule. ifeu Heidelberg, Beuth Hochschule, Berlin, Heidelberg. https://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/prof/jochum/Downloads/Anlagenpotenzial_Endbericht.pdf.

Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. Berlin; Karlsruhe.

Rüter, S.; Stümer, W.; Dunger, K. (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. In: *AFZ-DerWald*. No.13/2017.

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.

UBA (2016a): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. ifeu, INFRAS, LBST; Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungskennzahl 3712 45 100, Mai 2016.

UBA (2016b): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050.

UBA (2016c): Berichterstattung unter Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2016 - Inventarbericht zu Deutschen Treibhausgasen 1990-2014. In: *Nationaler Inventarbericht Deutschland - 2016*. Dessau-Roßlau.

UBA (2019a): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Dessau-Roßlau.

UBA (2019b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017.

UBA (2019c): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->. (28.07.2020).

UBA (2019d): Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Verminderung von CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen. In: *UBA-Texte 12/2019*. No.ifeu, FVT und INFRAS; im Auftrag des Umweltbundesamtes.

UBA (2020): Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück.
<https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>.

Umweltbundesamt (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.

UNEP (2016): Global Material Flows and Resource Productivity. Assessment Report for the UNEP International Resource Panel. Schandl, Heinz Fischer-Kowalski, Marina West, James Giljum, Stefan Dittrich, Monika Eisenmenger, Nina Geschke, Arne Lieber, Mirko Wieland, Hanspeter Schaffartzik, Anke Krausmann, Fridolin Gierlinger, Sylvia Hosking, Karin Lenzen, Manfred Tanikawa, Hiroki , Paris.

UNFCCC (2015): Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (28.07.2020).

USGS (2020): Mineral Commodity Summaries 2020.

Wiesen, K.; Teubler, J.; Saurat, M.; Wirges, M.; Steger, S.; Suski, P. (2016): Sachverständigengutachten Ressourcenrucksäcke im Energiebereich.

A Anhang

Die Endenergie der Gebäudewärme differenziert nach Gebäudetypen ist im Folgenden für die Jahre 2030, 2040 und 2050 dargestellt.

Tabelle 1: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2030

Endenergie (in TWh/a)	SUMME		Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
			<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a	<50 kWh/ m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a
	RW	WW	Raumwärme (RW)			Warmwasser (WW)		
Wohngebäude	316,7	94,0	65,7	242,7	8,2	29,4	63,4	1,2
Einfamilienhäuser (EFH)	142,3	36,1	20,7	113,3	8,2	7,4	27,5	1,2
Reihenhäuser (RH)	58,1	18,5	19,4	38,7	0,0	8,2	10,3	0,0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	92,7	30,7	19,3	73,4	0,0	9,9	20,7	0,0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	23,6	8,7	6,3	17,3	0,0	3,9	4,8	0,0
Nichtwohngebäude	158,1	25,3	43,1	82,6	32,3	14,2	8,4	2,7
Büro	29,1	3,1	3,9	21,1	4,1	1,0	1,9	0,2
Bildung	15,5	1,1	2,1	10,0	3,4	0,4	0,6	0,2
Baugewerbe	1,9	1,1	1,8	0,2	0,0	1,0	0,0	0,0
Nahrungsmittelgewerbe	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Landwirtschaft	11,4	2,4	9,5	1,9	0,0	2,1	0,2	0,0
Herstellungsbetriebe	1,6	0,8	1,4	0,2	0,0	0,8	0,0	0,0
Industrie	29,8	7,8	16,0	13,8	0,0	6,1	1,6	0,0
Textil, Bekleidung, Spedition	1,7	0,5	1,5	0,2	0,0	0,4	0,0	0,0
Handel	17,3	1,9	3,2	14,1	0,0	0,8	1,2	0,0
Wäschereien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kultur	9,7	0,4	0,4	2,5	6,7	0,1	0,1	0,2
Sport	5,7	0,5	0,6	4,0	1,2	0,2	0,3	0,1
Beherbergung	27,0	3,8	2,2	12,5	12,3	0,9	1,7	1,2
Krankenhäuser	7,1	1,8	0,3	2,2	4,6	0,3	0,7	0,9

Quelle: ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Tabelle 2: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2040

Endenergie (in TWh/a)	SUMME		Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
			<50 kWh/m² a	50-120 kWh/ m²a	>120 kWh/m² a	<50 kWh/ m²a	50-120 kWh/ m²a	>120 kWh/m² a
	RW	WW	Raumwärme (RW)			Warmwasser (WW)		
Wohngebäude	221,5	79,8	121,2	97,9	2,5	55,3	24,1	0,3
Einfamilienhäuser (EFH)	102,4	30,0	46,2	53,8	2,5	17,1	12,6	0,3
Reihenhäuser (RH)	42,4	15,9	28,4	14,0	0,0	12,3	3,7	0,0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	59,3	25,8	35,1	24,2	0,0	19,3	6,5	0,0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	17,4	8,0	11,6	5,9	0,0	6,7	1,4	0,0
Nichtwohngebäude	91,9	23,7	47,7	36,4	7,8	19,3	3,7	0,7
Büro	16,7	3,0	8,2	8,4	0,1	2,2	0,8	0,0
Bildung	10,5	1,0	4,2	6,1	0,2	0,7	0,3	0,0
Baugewerbe	0,9	1,1	0,9	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
Nahrungsmittelgewerbe	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Landwirtschaft	7,8	2,3	7,8	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0
Herstellungsbetriebe	0,6	0,8	0,6	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
Industrie	11,5	7,3	10,6	0,8	0,0	7,2	0,1	0,0
Textil, Bekleidung, Spedition	0,7	0,3	0,7	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0
Handel	9,7	2,0	5,2	4,5	0,0	1,5	0,4	0,0
Wäschereien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kultur	7,0	0,2	0,8	3,0	3,1	0,1	0,1	0,1
Sport	3,3	0,5	1,3	2,0	0,0	0,3	0,1	0,0
Beherbergung	17,4	3,5	6,7	8,9	1,9	2,3	1,0	0,2
Krankenhäuser	5,6	1,6	0,6	2,6	2,4	0,4	0,8	0,4

Quelle: ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Tabelle 3: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2050

Endenergie (in TWh/a)	SUMME		Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
			<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a	<50 kWh/ m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a
	RW	WW	Raumwärme (RW)			Warmwasser (WW)		
Wohngebäude	142,1	67,6	122,1	19,7	0,3	62,9	4,6	0,0
Einfamilienhäuser (EFH)	66,4	25,4	51,4	14,8	0,3	22,0	3,3	0,0
Reihenhäuser (RH)	29,4	14,3	27,2	2,3	0,0	13,7	0,5	0,0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	34,2	20,9	32,1	2,1	0,0	20,2	0,6	0,0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	12,0	7,1	11,6	0,5	0,0	7,0	0,1	0,0
Nichtwohngebäude	71,5	22,5	38,9	27,2	5,5	19,7	2,4	0,4
Büro	12,8	3,0	7,9	5,0	0,0	2,6	0,4	0,0
Bildung	9,0	1,0	3,7	5,3	0,0	0,8	0,2	0,0
Baugewerbe	0,6	1,1	0,6	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
Nahrungsmittelgewerbe	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Landwirtschaft	6,2	2,3	6,2	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0
Herstellungsbetriebe	0,4	0,8	0,4	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
Industrie	6,1	6,6	6,1	0,0	0,0	6,6	0,0	0,0
Textil, Bekleidung, Spedition	0,5	0,2	0,5	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Handel	7,1	2,0	4,7	2,4	0,0	1,8	0,2	0,0
Wäschereien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kultur	6,3	0,2	1,0	2,3	3,1	0,1	0,1	0,1
Sport	2,7	0,5	0,9	1,7	0,0	0,4	0,1	0,0
Beherbergung	14,7	3,3	6,1	8,6	0,0	2,5	0,8	0,0
Krankenhäuser	5,2	1,4	0,8	2,0	2,4	0,5	0,6	0,4

Quelle: ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Die Gesamtanzahl der Wohngebäude beträgt 2030 19,58 Mio. mit 4,60 Mrd. m² Nutzfläche (beheizte Wohnfläche und unbeheizte Nutzfläche) → 2040 19,11 Mio. mit 4,68 Mrd. m² → 2050 18,10 Mio. mit 4,61 Mrd. m².

Die Gesamtanzahl der Nichtwohngebäude beträgt 2030 3,91 Mio. mit 2,87 Mrd. m² Nutzfläche (beheizte Wohnfläche und unbeheizte Nutzfläche) → 2040 3,94 Mio. mit 2,89 Mrd. m² → 3,97 Mio. mit 2,92 Mrd. m²

Die Nutzfläche ist im Folgenden für die Gebäudetypen dargestellt und ist ebenso repräsentativ für die Gebäudeanzahl in den Klassen.

Tabelle 4: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Gesamtfläche

Nutzfläche (beheizte Wohnfläche + unbeheizte Nutzfläche) (in Mio. m²)	2030			2040			2050		
	<50 kWh/m²a	50-120 kWh/m²a	>120 kWh/m²a	<50 kWh/m²a	50-120 kWh/m²a	>120 kWh/m²a	<50 kWh/m²a	50-120 kWh/m²a	>120 kWh/m²a
Wohngebäude	1432	3107	61	3231	1433	4281	323	2	4281
Einfamilienhäuser (EFH)	377	1409	61	1061	783	20	1578	239	2
Reihenhäuser (RH)	403	510	0	743	221	0	943	37	0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	457	953	0	1047	351	0	1298	40	0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	194	235	0	380	77	0	462	7	0
Nichtwohngebäude	1694	945	228	2427	410	54	2606	274	37
Büro	125	231	30	287	101	1	345	47	0
Bildung	66	99	25	132	58	1	147	46	0
Baugewerbe	116	2	0	119	0	0	120	0	0
Nahrungsmittelgewerbe	9	0	0	9	0	0	9	0	0
Landwirtschaft	281	30	0	313	0	0	316	0	0
Herstellungsbetriebe	103	3	0	106	0	0	107	0	0
Industrie	675	179	0	851	11	0	871	0	0
Textil, Bekleidung, Spedition	88	3	0	91	0	0	92	0	0
Handel	117	181	0	235	66	0	266	38	0
Wäschereien	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Kultur	13	28	44	27	39	21	36	30	21
Sport	21	37	8	48	19	0	52	16	0
Beherbergung	70	127	90	191	84	14	218	72	0
Krankenhäuser	9	26	30	16	33	16	25	25	16

Quelle: ifeu/IEE/SSG - GEMOD