

CLIMATE CHANGE

05/2020

# Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme

Abschlussbericht



CLIMATE CHANGE 05/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 41 115 0

FB000439/5

# **Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme**

Abschlussbericht

von

Dr. Monika Dittrich, Frank Dünnebeil, Susanne Köppen,  
Dr. Amany von Oehsen, Regine Vogt, Dr. Kirsten  
Biemann, Horst Fehrenbach, Birte Ewers  
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH,  
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](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

■ [/umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

📱 [/umweltbundesamt](https://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

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

### Abschlussdatum:

September 2020

### Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 "Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie"  
Katja Purr

Fachgebiet I 1.2 "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](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](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](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](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](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](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: Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme**

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 GreenSupreme (Germany – resource efficient and GHG neutral – Minimierung von Treibhausgas-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum) ist das ambitionierteste Szenario und beinhaltet sowohl ambitionierte technologische als auch gesellschaftliche Änderungen. Im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien findet die Transformation frühzeitiger statt. Dies betrifft nahezu alle Industrie- und Konsumbereiche von der Nahrung, über den Gebäude- bzw. Wohnsektor, die Mobilität bis zum Konsum von Kleidung und anderen Waren und Dienstleistungen. Es beinhaltet ebenso die grundlegende Transformation des Energiesystems einschließlich des Ausstiegs aus fossilen Rohstoffen und einer tiefgreifenden Sektorkopplung. Der Endenergiebedarf kann von 2.500 TWh in 2015 auf nur 1.080 TWh reduziert werden (ohne rohstoffliche Bedarfe), der Anteil der erneuerbaren Energien steigt bereits auf 75 % in 2030 und 100 % in 2050.

Im Ergebnis wird in GreenSupreme im Jahr 2050 der Rohmaterialkonsum gegenüber 2010 um 70 % reduziert. Der Anteil der Sekundärmaterialien am gesamten (primär- und sekundär-) Rohstoffbedarf steigt auf 33 %. Pro Person werden nur noch 5,7 Tonnen Rohstoffe konsumiert, davon 2,1 Tonnen Biomasse, die überwiegend für die Ernährung gebraucht werden. Die ambitionierten technologischen Änderungen, einschließlich Substitutionen (wie die der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Energien) sowie Steigerungen der Rohstoffeffizienz und des Recyclings, in Kombination mit einem nachhaltigen Konsum, reduzieren die Nachfrage nach einer Vielzahl von Rohstoffen, so dass unter den Szenario-Annahmen nur noch bei wenigen der untersuchten Metalle unter Fortschreibung aktueller Produktionsmengen und Berücksichtigung gegenwärtig bekannter Reserven eine Knappheit zu erwarten ist.

Die Treibhausgasemissionen bilanziert nach NIR ohne Berücksichtigung der Senken können bis 2050 um 96,7 % gegenüber 1990 reduziert werden, bis 2030 liegt der Rückgang der THG-Emissionen bereits bei 70,1 %. Allerdings können nur im Energie- und Verkehrssektor die Treibhausgase bis 2050 vollständig vermieden werden. In den anderen Quellgruppen Industrie, Landwirtschaft, Abfall und LULUCF (ohne Wald) verbleiben THG-Emissionen, die nach dem heutigen Wissensstand noch nicht vollständig vermeidbar sind. In 2050 ist unter Einbeziehung natürlicher Senken Treibhausgasneutralität sicher erreichbar.

### **Abstract:**

The German Environment Agency has been investigating for many years how sustainable development and a greenhouse-gas-neutral and resource-efficient lifestyle can be achieved. In this context, the interdisciplinary research project “RESCUE” (Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality) was started. The project was implemented successfully with a high proportion of own research by the German Environment Agency and intensive involvement of external scientists through the research project to which this report belongs (FKZ 3715411150). Six transformation scenarios were developed. The ‘Green’-scenarios

describe transformation pathways towards a resource-efficient and greenhouse-gas-neutral Germany by 2050 with different levels of ambition.

The scenario GreenSupreme (Germany – Resource-efficient and GHG-neutral – Minimization of greenhouse gas emissions and raw material consumption in the observation period) is the most ambitious scenario and includes both ambitious technological and societal changes. In comparison to the other ‘Green’ scenarios, the transformation takes place earlier. Nearly all areas of consumption from food, housing and mobility to the consumption of clothing and other goods and services are affected. The energy system is fundamentally transformed; fossil fuels are phased out and far-reaching sector coupling is implemented. Final energy demand can be reduced from 2,500 TWh in 2015 to only 1,080 TWh (without raw material requirements), the share of renewable energy increases to 75 % by 2030 and to 100 % by 2050.

As a result, raw material consumption in GreenSupreme can be reduced by 70 % in 2050 compared to 2010. The share of secondary materials of total (primary and secondary) raw material requirements increases to 33 %. Only 5.7 tons of raw materials are consumed per person, of which 2.1 tons are biomass, which are mainly used for nutrition. The ambitious technological changes include substitutions, such as those of fossil raw materials by renewable energies, increases in raw material efficiency and recycling. In combination with sustainable consumption, they reduce the demand for a large number of raw materials. In contrast to the other ‘Green’ scenarios, shortages are expected only for a small number of metals if current production volumes are updated based on currently known reserves.

Greenhouse gas emissions according to NIR not considering sinks can be reduced by 96.7 % in 2050 compared to 1990. In 2030, GHG emissions are already reduced by 70.1 %. In the energy and transport sector, greenhouse gas emissions can be reduced to zero by 2050. However, according to our current knowledge, some GHG emissions from industry, agriculture, waste and LULUCF (without forest) are unavoidable. In 2050, greenhouse gas neutrality can be achieved with certainty by including natural sinks.

## Inhaltsverzeichnis

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	9
Abbildungsverzeichnis.....	12
Tabellenverzeichnis.....	14
Abkürzungsverzeichnis.....	17
Zusammenfassung.....	20
Summary.....	29
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>38</b>
1.1 Herausforderung Klimawandel und die Green-Szenarien.....	38
1.2 GreenSupreme: Leitlinien und Ausrichtung.....	39
1.3 Aufbau des Berichts.....	40
<b>2 Methodik.....</b>	<b>42</b>
<b>3 Allgemeine Annahmen.....</b>	<b>45</b>
3.1 Rahmendaten.....	45
3.1.1 Bevölkerungsentwicklung.....	45
3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung.....	45
3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz.....	46
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.....	47
3.2 Treibhausgas-Emissionsziel 2030 und 2040.....	47
<b>4 Sektorale Annahmen.....</b>	<b>49</b>
4.1 Landwirtschaft.....	49
4.2 Flächennutzung und LULUCF.....	50
4.3 Industrie.....	50
4.3.1 Stahlindustrie.....	51
4.3.2 Nicht-Eisen-Metallindustrie.....	52
4.3.3 Gießereiindustrie.....	53
4.3.4 Chemische Industrie.....	53
4.3.5 Zementindustrie.....	55
4.3.6 Kalkindustrie.....	56
4.3.7 Glasindustrie.....	57
4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie.....	57

4.3.9	Nahrungsmittelindustrie.....	58
4.3.10	Textilindustrie .....	58
4.4	Abfall und Abwasser .....	59
4.5	Gebäude.....	60
4.5.1	Rahmenannahmen und Energienachfrage .....	60
4.5.2	Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs.....	60
4.5.3	Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes .....	61
4.5.4	Optimierung der Wärmebereitstellung .....	61
4.5.5	Rohstoffliche Annahmen im Gebäudebereich.....	62
4.6	Verkehr.....	63
4.6.1	Vermeidung und Verlagerung im Personenverkehr .....	63
4.6.2	Entwicklung der Flotten im Personenverkehr .....	65
4.6.3	Vermeidung und Verlagerung im nationalen Güterverkehr.....	68
4.6.4	Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr .....	69
4.6.5	Internationaler Verkehr .....	70
4.7	Weitere Sektoren.....	71
4.7.1	Sonstige THG-Emissionen .....	71
4.7.2	Überregionale Infrastruktur: Stromnetze .....	72
4.7.3	Kommunale Infrastrukturen .....	73
4.7.4	Dienstleistungen und Konsumänderungen .....	73
4.7.5	Sonstige Produktions- und Dienstleistungssektoren.....	74
4.8	Energieversorgung .....	74
4.8.1	Festlegung verschiedener Parameter.....	74
4.8.2	Technologieannahmen für Photovoltaik- und Windenergieanlagen .....	75
4.8.3	Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik .....	76
4.8.4	Markthochlauf von PtG/L und Zuordnung auf Anwendungsbereiche.....	77
4.8.5	Herkömmlicher Stromverbrauch .....	77
4.8.6	Biomassennutzung.....	78
4.8.7	Sonstige Rest- und Abfallströme.....	79
5	Ergebnisse .....	81
5.1	Energie .....	81
5.1.1	Endenergiebedarfe .....	81
5.1.2	Stromsektor .....	83
5.1.3	Wärmesektor .....	87

5.1.4	Verkehrssektor.....	91
5.1.5	Gas- und PtL-Versorgung .....	93
5.1.6	Europäischer Rahmen .....	96
5.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen .....	99
5.2.1	Übersicht über die Entwicklung aller Treibhausgasemissionen .....	99
5.2.2	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen.....	101
5.2.3	Emissionen einschließlich Vorketten .....	106
5.2.4	Kumulierte THG-Emissionen .....	107
5.2.5	Vergleich der Treibhausgasemissionen mit den GreenEe-Szenarien .....	108
5.3	Der Konsum von Rohstoffen .....	110
5.3.1	Der gesamtwirtschaftliche Konsum von Primärrohstoffen .....	110
5.3.2	Rohstoffkonsum nach ausgewählten Rohstoffen.....	121
5.3.3	Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe2 .....	127
5.4	Flächenentwicklung .....	128
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	130
	Quellenverzeichnis .....	136

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung Z- 1:	Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenSupreme .....	22
Abbildung Z- 2:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenSupreme .....	23
Abbildung Z- 3:	Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050.....	25
Abbildung Z- 4:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050 ..	27
Figure Z- 1:	Development of final energy demand in GreenSupreme .....	31
Figure Z- 2:	Net electricity generation and consumption in Germany, GreenSupreme .....	32
Figure Z- 3:	Primary raw material consumption (RMC) by raw material, 2010 to 2050.....	34
Figure Z- 4:	Greenhouse gas emissions by sources, 1990 to 2050.....	36
Abbildung 1:	Entwicklung der Endenergiebedarfe .....	81
Abbildung 2:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland .....	83
Abbildung 3:	Installierte Leistungen Deutschland .....	85
Abbildung 4:	Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050 .....	86
Abbildung 5:	Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Raum- und Trinkwarmwasserwärme in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden (GHD) – GreenSupreme sowie GreenLife .....	88
Abbildung 6:	Deckung der Wärmenachfrage.....	88
Abbildung 7:	Zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD-Prozesswärme – GreenSupreme .....	90
Abbildung 8:	Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme ....	91
Abbildung 9:	Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und Versorgung	93
Abbildung 10:	Notwendiger Markthochlauf für eine PtX-Import-Infrastruktur .....	94
Abbildung 11:	Zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe).....	95
Abbildung 12:	Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert) .....	96
Abbildung 13:	Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050.....	97
Abbildung 14:	Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050.....	98
Abbildung 15:	Installierte Leistungen Europa 2050 in GreenSupreme .....	99
Abbildung 16:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050	100
Abbildung 17:	THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte, 2010 bis 2050...	106

Abbildung 18:	THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050 .....	107
Abbildung 19:	Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050 .....	108
Abbildung 20:	Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050 ...	112
Abbildung 21:	Letzte inländische Verwendung der Basis- und Technologie- bzw. Edelmetalle, 2010 bis 2050 .....	113
Abbildung 22:	Entwicklung von ausgewählten Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050 .....	114
Abbildung 23:	Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität, 1994 bis 2050 .....	115
Abbildung 24:	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person, 2010 bis 2050 .....	116
Abbildung 25:	Der RMC nach Verwendungskategorien in 2010 und 2050 ...	117
Abbildung 26:	Der Konsum der privaten Haushalte nach Bedürfnisfelder in 2010 und 2050 .....	118
Abbildung 27:	Kumulierter Primärrohstoffkonsum (LIV), 2010 bis 2050 .....	119
Abbildung 28:	Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 bis 2050 .....	120
Abbildung 29:	Primär- und Sekundärmengen der Basismetalle in der letzten inländischen Verwendung, 2010 -bis 2050 .....	122
Abbildung 30:	Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018 .....	125
Abbildung 31:	Kumulierte Nachfrage 2018 - 2050 ausgewählter Rohstoffe als Anteil der Reserven in 2018 .....	126

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich.....	39
Tabelle 2:	Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung.....	45
Tabelle 3:	Energetische Nutzung der Restbiomassepotenziale bis 2050..	47
Tabelle 4:	Entwicklung der Viehbestände im GreenSupreme-Szenario ...	50
Tabelle 5:	Annahmen Stahlindustrie.....	51
Tabelle 6:	Annahmen NE-Metallindustrie.....	52
Tabelle 7:	Annahmen Gießereiindustrie .....	53
Tabelle 8:	Annahmen chemische Industrie.....	54
Tabelle 9:	Annahmen Zementindustrie .....	56
Tabelle 10:	Annahmen Kalkindustrie .....	56
Tabelle 11:	Annahmen Glasindustrie .....	57
Tabelle 12:	Annahmen Zellstoff- und Papierindustrie .....	58
Tabelle 13:	Annahmen Nahrungsmittelindustrie.....	58
Tabelle 14:	Annahmen Textilindustrie .....	59
Tabelle 15:	Annahmen Abfall und Abwasser .....	60
Tabelle 16:	Wesentliche Rahmenparameter im Gebäudebereich.....	60
Tabelle 17:	Nutz- und Endenergie der Wohn- und Nichtwohngebäude in 2030, 2040 und 2050 in TWh .....	61
Tabelle 18:	GreenSupreme-Annahmen zur Nah- & Fernmobilität der Bevölkerung im urbanen Raum .....	64
Tabelle 19:	Nationale Personenverkehrsleistungen in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2.....	65
Tabelle 20:	Annahmen zu Reichweiten neu zugelassener Elektro-Pkw in GreenSupreme im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien .....	65
Tabelle 21:	Leichtbauvarianten neu zugelassener Elektro-Pkw in den GreenEe-Szenarien und GreenSupreme.....	66
Tabelle 22:	Nationale Güterverkehrsleistungen in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2.....	69
Tabelle 23:	Anteile vollelektrischer Oberleitungs-Lkw an den Neuzulassungen in GreenSupreme .....	69
Tabelle 24:	Übersicht der Annahmen in Prozent zur Aufteilung Kupfer- und Aluminiumbasierte Leitungen/Kabel.....	72
Tabelle 25:	Überblick zu Annahmen in der Energieversorgung GreenSupreme im Vergleich zu den GreenEe-Szeanarien .....	74
Tabelle 26:	Klassischer Stromverbrauch GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2 .....	77
Tabelle 27:	Stromerzeugung in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2	78
Tabelle 28:	Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien ....	79
Tabelle 29:	Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industrielle Reststoffen) in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2 .....	79

Tabelle 30:	Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenSupreme im Vergleich mit den GreenEe-Szenarien.....	80
Tabelle 31:	Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2.....	82
Tabelle 32:	Nettostromerzeugung in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2 .....	84
Tabelle 33:	Nettostromverbrauch zuzüglich Verluste in GreenSupreme im Vergleich zur GreenEe2 .....	84
Tabelle 34:	Markthochlauf Wind-Onshore und PV .....	86
Tabelle 35:	Installierte Leistungen in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2 .....	87
Tabelle 36:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2 .....	89
Tabelle 37:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung.....	89
Tabelle 38:	EEV nach Verkehrsmitteln .....	91
Tabelle 39:	EEV nach Energieträgern .....	92
Tabelle 40:	Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenSupreme.....	94
Tabelle 41:	Entwicklung der PtG/L-Importmengen im Vergleich zwischen GreenEe2 und GreenSupreme .....	95
Tabelle 42:	THG-Emissionsminderungen GreenSupreme in 2030 und 2050 gegenüber 1990.....	100
Tabelle 43:	Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq .....	101
Tabelle 44:	Prozessbedingte THG-Emissionen nach Industriesektoren in t CO <sub>2</sub> Äq .....	102
Tabelle 45:	THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO <sub>2</sub> Äq.....	103
Tabelle 46:	THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO <sub>2</sub> Äq .....	103
Tabelle 47:	THG-Emissionen Sektor Landwirtschaft in t CO <sub>2</sub> Äq .....	104
Tabelle 48:	Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen im GreenSupreme-Szenario Szenario in t CO <sub>2</sub> Äq .....	104
Tabelle 49:	THG-Emissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO <sub>2</sub> Äq .....	105
Tabelle 50:	Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO <sub>2</sub> Äq .....	105
Tabelle 51:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenSupreme und GreenEe1 in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> Äq.....	109
Tabelle 52:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenSupreme und GreenEe2 in Mio. Tonnen CO <sub>2</sub> Äq.....	109

Tabelle 53:	Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010 bis 2050 in Rohmaterialäquivalenten (RME) .....	110
Tabelle 54:	Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050 .....	123
Tabelle 55:	Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien.....	123
Tabelle 56:	Der Rohstoffkonsum (RMC) in GreenSupreme und GreenEe im Vergleich in Tsd. Tonnen RME.....	127
Tabelle 57:	Flächennutzung in Deutschland, 2010, 2030, 2040 und 2050.....	128

## Abkürzungsverzeichnis

ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
BEV	Battery Electric Vehicle - Elektrofahrzeug
bevOH-Lkw	Oberleitungs-Lkw mit zusätzlichem Batteriespeicher (rein elektrischer Betrieb)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
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
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CO <sub>2</sub> Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
CH <sub>4</sub>	Methan
C <sub>syn</sub>	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 Protection 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
LV	Letzte Verwendung
LIV	Letzte inländische Verwendung
MBA	Mechanisch-biologische Behandlungsanlage
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierungsanlage
MFH	Mehrfamilienhäuser
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NEP	Netzentwicklungsplan
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 sogenannte Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitgehende Treibhausgasneutralität wird im Projekt RESCUE dahingehend definiert, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden. 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 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](http://www.uba.de/rescue-projekt). Dieser Bericht dokumentiert das Szenario Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Minimierung von Treibhausgas-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum, kurz: GreenSupreme.

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

	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Energieeffizienz	Sehr hoch	Sehr hoch	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Materialeffizienz	Hoch	Hoch	Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Technikinnovation	Hoch	Hoch	Gering	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Nachhaltiges Handeln	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Wachstumsbefreiung	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Ausgleich des globalen Technologieniveaus	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch

	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Verringerung der Flächenneuversiegelung	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Klimaschutzbestrebungen im Pfad	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch

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

## Ausrichtung des Szenarios GreenSupreme

Wie alle Green-Szenarien beschreibt auch das GreenSupreme-Szenario eine Transformation zu einem treibhausgasneutralen Deutschland in 2050. GreenSupreme zeichnet sich durch schnelle ambitionierte Veränderungen sowohl hinsichtlich der technologischen Umstellungen als auch im Lebensstil der Menschen in Deutschland aus. Im Szenario GreenSupreme wurde außerdem im Gegensatz zu allen anderen Szenarien eine Wachstumsbefreiung unterstellt, das heißt, dass das BIP-Wachstum bis 2030 auf null zurückgeht und zwischen 2030 und 2050 stagniert. Für eine ausführliche Beschreibung des Narrativ siehe UBA (2019a).

Wie die anderen Green-Szenarien findet auch im GreenSupreme-Szenario ein Ausstieg aus der Nutzung fossiler Rohstoffe statt. Im Gegensatz zu anderen Green-Szenarien verläuft der Ausstieg schneller. Bereits 2030 wird der Strom vollständig auf der Basis von erneuerbaren Energien produziert. Der Umstieg auf strombasierte Techniken vollzieht sich schneller. Kohle wird bereits in 2040 auch in der Industrie nicht mehr genutzt.

Wie GreenMe zeichnet sich auch GreenSupreme durch eine stark steigende Materialeffizienz in allen Sektoren aus. Dies betrifft sowohl das Recycling als auch Materialsubstitutionen, und hierbei insbesondere die Substitutionen von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe. Wie in GreenMe werden Ressourceneffizienzmaßnahmen in einem höheren Umfang in Unternehmen in allen Sektoren, einschließlich Dienstleistungen umgesetzt. Wie in GreenLife verändern Konsumenten auch in GreenSupreme die Ernährungsweise, auch hier bereits bis 2040. Auch ändert sich ferner das Mobilitätsverhalten der Menschen, sie nutzen treibhausgasintensive Verkehrsträger seltener und anstelle dessen stärker Angebote des ÖPNV und von Sharing-Diensten. Auch Fernreisen werden weniger nachgefragt. Die Menschen leben in kleineren Wohnungen und kaufen vermehrt nachhaltige Produkte. Sie sparen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien zusätzlich Energie und verursachen weniger Abfälle. Die Waren und Technologien sind ressourceneffizienter und langlebiger.

Eine weitere wichtige Leitlinie in GreenSupreme ist die technologische Entwicklung im Rest der Welt. Wie in GreenMe und im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien wird eine sehr ambitionierte Umstellung angenommen, so dass in 2050 der Rest der Welt die Klimaschutzanstrengungen und technologischen Vorsprung in Deutschland und Europa aufgeholt hat.

In GreenSupreme sind die Produktionsmengen wichtiger Basisindustrien nicht vorgegeben, sondern sie werden auf der Basis der angenommenen Nachfrageänderungen ermittelt. Dadurch verzeichnet Deutschland, im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate, keinen ansteigenden Handelsüberschuss.

In GreenSupreme wird eine Wachstumsbefreiung angenommen. Das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts sinkt bis 2030 auf null, danach findet kein gesamtwirtschaftliches Wachstum statt. Aufgrund der rückläufigen Bevölkerung steigt das Einkommen pro Person weiterhin.

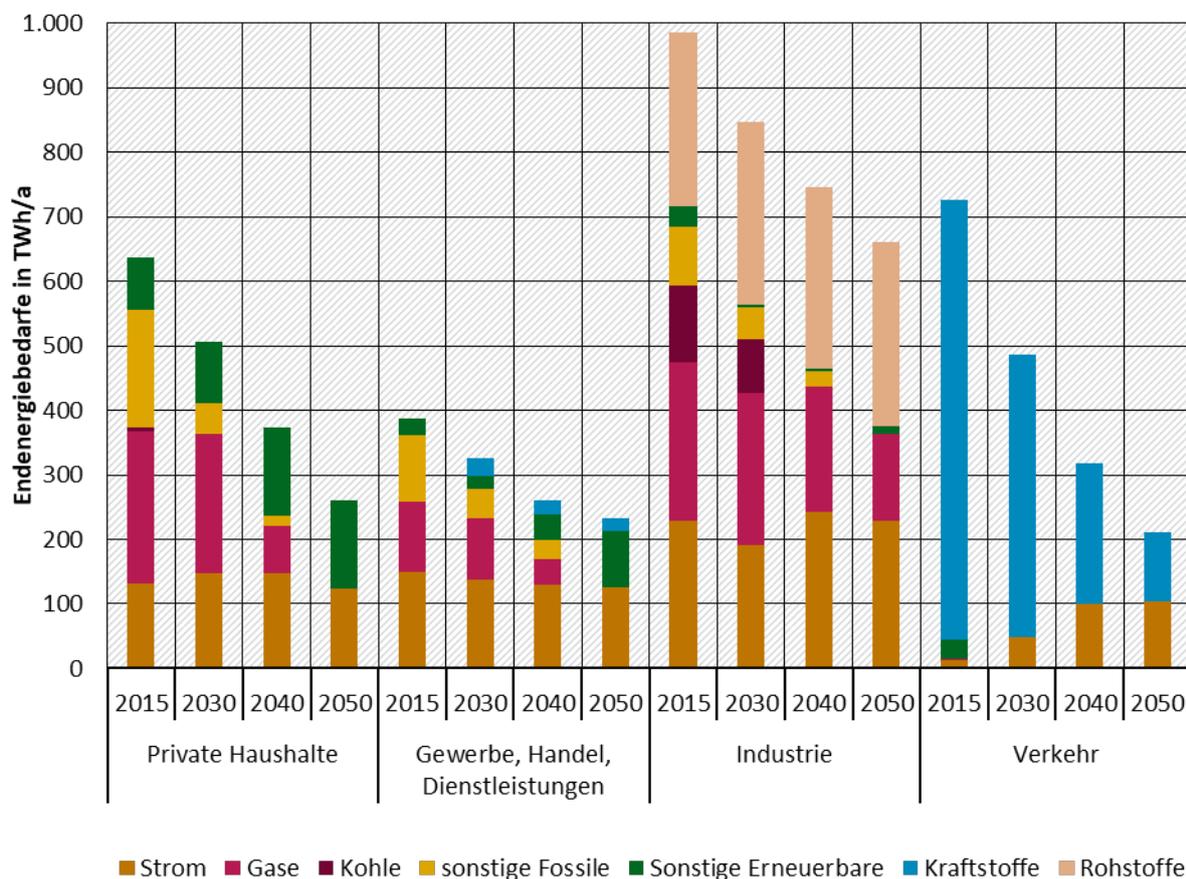
GreenSupreme beschreibt somit im Vergleich zu anderen Green-Szenarien den Pfad mit den höchsten technisch möglichen Änderungen und gleichzeitig den höchsten Änderungen des Konsumverhaltens der Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung einer sehr schnellen Transformation. Die Ergebnisse quantifizieren die geringeren Energie- und Rohstoffbedarfe und die geringeren Treibhausgasemissionen, die sich aus einer umfassenden, ambitionierten und schnellen Umstellung ergeben.

## Wesentliche Ergebnisse

### Energie

Im GreenSupreme-Szenario sinkt der Endenergiebedarf über alle Anwendungsbereiche in 2050 auf 1.366 TWh. Den größten Anteil von 661 TWh verbraucht die Industrie (48,4 %), 286 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (19,1 %), GHD (17 %) und – was beachtlich ist – an letzter Stelle dem Verkehr (15,5 %).

Abbildung Z- 1: Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenSupreme

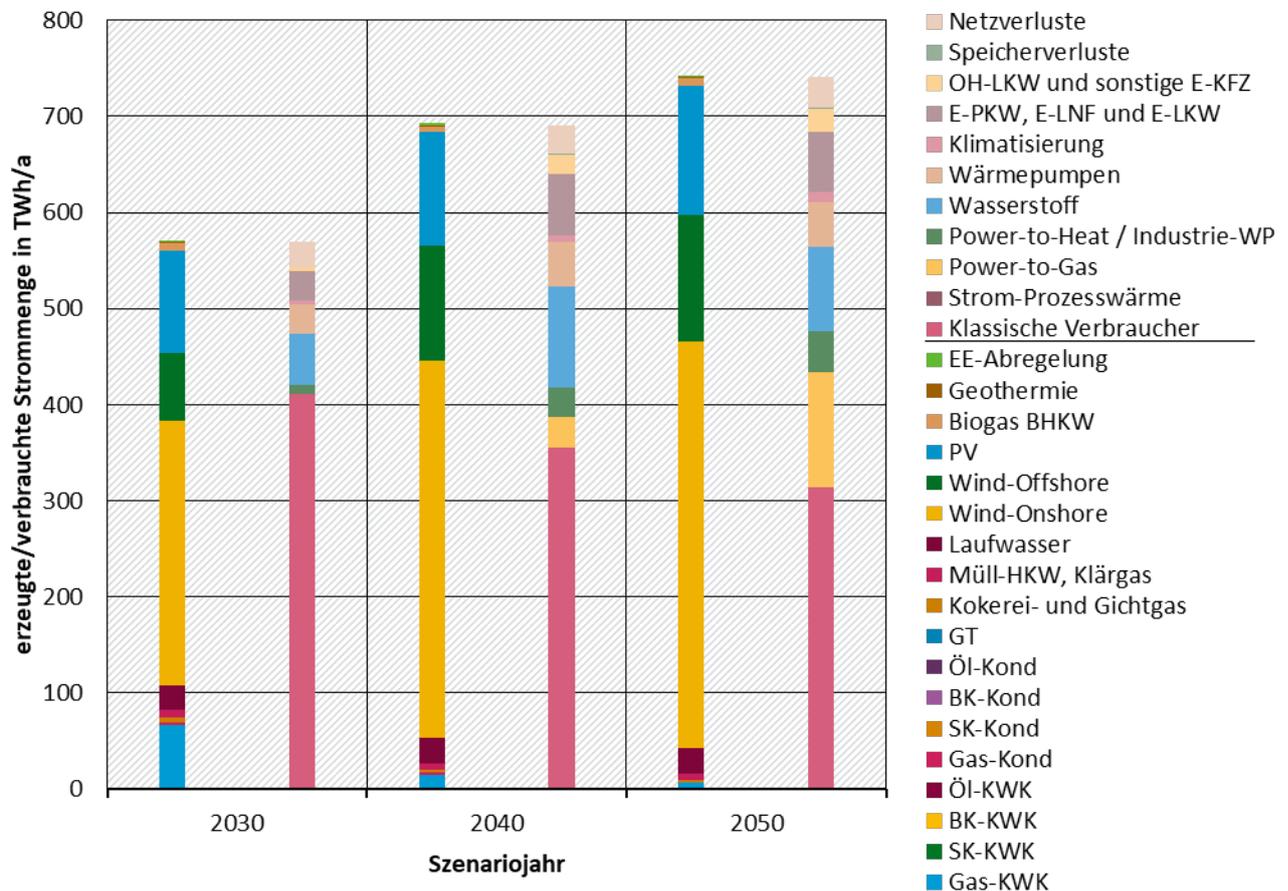


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Die nationale Nettostromerzeugung steigt kontinuierlich auf insgesamt 740,7 TWh in 2050, und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien gedeckt. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Techniken im Transformationspfad. Insbesondere Windenergie onshore kann frühzeitig hohe Anteile zur Stromerzeugung beitragen, so dass bereits im Jahr 2040 eine nationale PtG-Erzeugung möglich ist, weil die Potenziale für eine direkte Stromnutzung ausgeschöpft sind. In 2050 liegt die installierte Leistung bei 127,4

GW Windkraftanlagen onshore (die aber bereits schon 2040 erreicht wird), gut 30 GW Windkraftanlagen offshore (2040 gut 27 GW) sowie 130,5 GW Photovoltaikanlagen (2040 rund 119 GW).

**Abbildung Z- 2: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenSupreme**



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

Auch wenn GreenSupreme nicht direkt mit einem anderen der GreenEe-Szenarien verglichen werden kann um die Wirkung eines einzelnen Parameters zu analysieren wird im Folgenden der Fokus auf den Vergleich mit GreenEe2 gelegt um den Einfluss von Materialeffizienz und Technikinnovation sowie Lebenswandel bewerten zu können. Dabei ist aber die Reduktion der Produktionsmengen „Nullwachstum“ in GreenSupreme gegenüber „ausgeglichene Handelsbilanz“ in GreenEe2 nicht gleichzusetzen aber im Hinblick auf die Exportüberschüsse in GreenEe1 der bessere Vergleich.

Aus dem Vergleich mit dem GreenEe2-Szenario wird deutlich, dass mittelfristig ein schneller Anstieg aber langfristig eine deutlich geringere nationale Stromerzeugung notwendig wird (langfristig – 47 TWh). Die durch den Kohleausstieg 2030 wegfallende Stromerzeugung führt dabei nur zu einer moderaten Mehrerzeugung von Gaskraftwerken. Vor allem wird dies durch deutlich mehr Wind- und PV-Stromerzeugung kompensiert und auch noch der Mehrstromverbrauch in 2030 gedeckt. Der Vergleich des Stromverbrauchs zeigt, dass der höhere mittelfristige Stromverbrauch insbesondere auf den früher einsetzenden Wasserstoffstromverbrauch der Industrie zurückzuführen ist. Der Stromverbrauch von Elektromobilität und Wärmepumpen ist dagegen mittelfristig nur moderat höher, da die höhere Durchdringung der Techniken hier noch die Verbrauchseinsparung überwiegt. Durch den

höheren Ausbau der erneuerbaren Energien ist zudem in 2040 mehr „überschüssiger Strom“ für PtH-Anwendungen verfügbar, und 2040 kann auch schon in Deutschland PtG hergestellt werden. Langfristig ist vor dem Hintergrund der Leitlinien in GreenSupreme (Effizienz + Suffizienz bei Null-Wachstum) dagegen der Stromverbrauch in vielen Anwendungen geringer als in allen anderen Green-Szenarien (Fokus auf Effizienz bzw. bei GreenLife Suffizienz bei Wirtschaftswachstum).

Im Vergleich zum GreenEe2-Szenario ist der langfristige Brennstoffbedarf deutlich geringer (in 2050 - -98 TWh). Es zeigen sich langfristig deutliche Einsparung durch die Lebensstieländerung, Null-Wachstum und Effizienz. In GreenSupreme wurde weniger Strom in den Anwendungen verbraucht. Deswegen können die kostengünstigen Erzeugungspotenziale genutzt werden und mehr nationales PtG/L als in allen anderen Green-Szenarienerzeugt werden. Dennoch tritt hier eine Sättigung durch die höhere PV-Kosten (mehr Dachflächen) ein, da die PtG/L-Erzeugungsmenge gegenüber GreenEe2 trotz geringerem Gesamtstromverbrauch nicht weiter gesteigert werden konnte. Aufgrund des geringeren Brennstoffverbrauchs ist das Verhältnis zwischen PtG/L-Importen zu nationaler PtG/L-Erzeugung langfristig deutlich weniger importabhängig als in allen anderen Green-Szenarien. Der Anteil der Importe am Gesamtverbrauch liegt mit 77,6 % niedriger als in beispielsweise GreenEe2 mit 81 %.

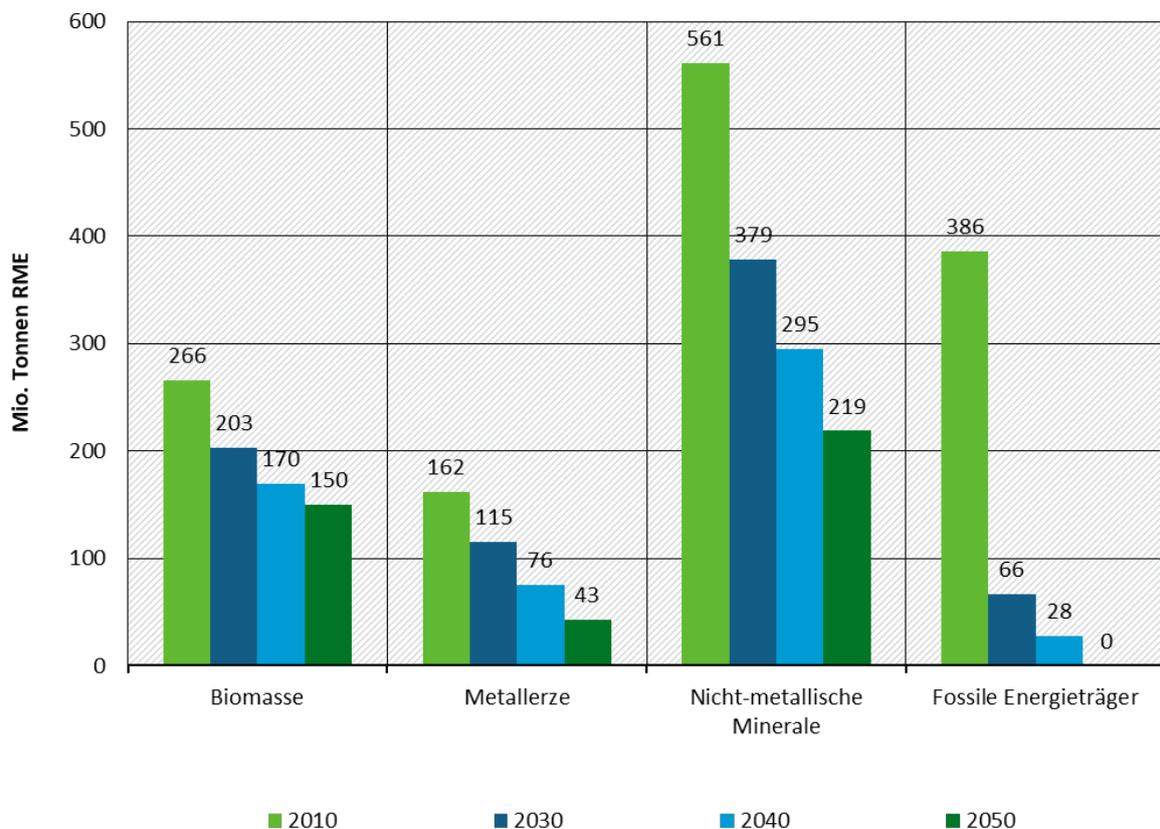
Der Gebäudewärmebereich entspricht dem Szenario Green-Life. Hier steigt die bewohnte Pro-Kopf Wohnfläche wie in den weiteren Green-Szenarien ebenfalls bis zum Jahr 2030 weiter an, liegt 2030 jedoch mit 46 m<sup>2</sup>/Kopf auf einem niedrigeren Niveau und sinkt anschließend bis 2050 auf 41 m<sup>2</sup>/Kopf. Die resultierende Gesamtwohnfläche ist deutlich rückläufig ist und liegt in 2050 bei knapp 3 Mrd. m<sup>2</sup> bzw. rund 15 % niedriger als in den weiteren GreenEe-Szenarien. Der Endenergieverbrauch für Raumwärme von Wohngebäuden liegt um 20 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Hauptsächlich zurückzuführen ist dieses auf die niedrige Wohnfläche und den niedrigeren Anteil der Flächen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH) gegenüber dem Anteil der Flächen in Mehrfamilienhäusern (MFH). Da die Unterschiede im Nichtwohngebäudebereich gering sind, ist der Endenergiebedarf in Summe für alle Gebäude um 15 % geringer als in den GreenEe-Szenarien. Durch den höheren Mehrfamilienhausanteil und die Verstädterung stieg auch der Anteil von Fernwärme von 20 % auf 24 %. Der Rest der Gebäude wird mit Wärmepumpen versorgt, wobei hier der Markthochlauf möglichst schnell und damit an der Obergrenze stattfindet.

Im Verkehrssektor liegt der Endenergieverbrauch in 2050 bei insgesamt 208 TWh. Davon entfallen 156 TWh auf den nationalen Verkehr und 52 TWh auf den internationalen Verkehr. Aufgrund der sehr starken Rückgänge durch sehr ambitionierte Annahmen sowohl zur Verkehrsverlagerung/Vermeidung als auch Elektrifizierung liegen die Verbräuche im motorisierten Individualverkehr (67 TWh in 2050 ggü. 384 TWh in 2010) nur noch wenig höher als im Straßengüterverkehr (57 TWh ggü. 193 TWh in 2010) gefolgt vom internationalen Flugverkehr, der mit 42 TWh in 2050 ggü. 87 TWh in 2010 auch ohne die Option der Elektrifizierung infolge der ggü. den GreenEe-Szenarien nahezu halbierten Verkehrsleistungen einen sehr starken Rückgang aufweist. Es zeigt sich, dass in GreenSupreme der nationale Verkehr im Jahr 2030 zwar nur 10 % weniger Endenergie benötigt als GreenEe2, aber bis 2050 diese Endenergieeinsparung auf 25 % steigt. Im internationalen Verkehr führen die die Maßnahmen zu Endenergieeinsparungen um 11 % (2030) bis 43 % (2050). Im Jahr 2050 werden in GreenSupreme 10 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 43 % (sowohl national als auch international) geringer als in den GreenEe2.

## Rohstoffe

Die Transformation in GreenSupreme führt zu einer Reduktion des Primärrohstoffkonsums (Raw Material Consumption (RMC)) um 70,1 % gegenüber 2010 auf insgesamt 411 Mio. Tonnen Rohmaterialäquivalente. Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die um 100 % zurückgehen, da weder im In- noch im Ausland fossile Energieträger genutzt werden. Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (-82,8 %). Der RMC für nicht-metallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 61 %. Der RMC sinkt bei den Metallerzen bis 2050 um 73,8 %) und bei der Biomasse um 43,5 %. Der Rückgang des RMC verläuft bei den fossilen Rohstoffen zwischen 2010 und 2030 sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

**Abbildung Z- 3: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050**



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

Die Gesamtrohstoffproduktivität (Letzte Verwendung / Rohmaterialinput) steigt zwischen 2010 und 2030 [2030 bis 2040 / 2040 bis 2050] um 2,7 % [2,1 %/3,1 %] im Jahresdurchschnitt. Sie liegt um 379 Indexpunkte höher im Vergleich zum Jahr 1994.

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen sinkt auf 5,72 Tonnen pro Person in 2050, was einem Rückgang um 66 % im Vergleich zu 2010 entspricht.

Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte sinkt auf 182 Mio. Tonnen RME in 2050. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist in 2050 das rohstoffintensivste mit 106 Mio. Tonnen RME, gefolgt vom Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus (28 Mio. t RME) und Wohnen und Haushalt (25 Mio. t RME).

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen auf insgesamt 35,052 Mrd. Tonnen RME. Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (46,9 %), gefolgt von biotischen Materialien (25,6 %) und fossilen Rohstoffen (16,8 %).

Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 206 Mio. Tonnen Primärrohstoffe in 2050 eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 33 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation zu allen anderen Green-Szenarien führt die Transformation in GreenSupreme zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 21,8 % niedriger als beispielsweise in GreenEe2. Der Unterschied ist bei allen abiotischen Rohstoffen, und dabei insbesondere bei den fossilen Rohstoffen, stark ausgeprägt. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 ebenso um 21,8 % niedriger als bei GreenEe2.

In GreenSupreme werden alle untersuchten Metalle sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer geringeren Menge als in allen anderen Green-Szenarien nachgefragt. In Folge ist unter den Szenarioannahmen insgesamt eine geringere Knappheit zu erwarten. Im Pfad und in 2050 ist nur bei PGM und Lithium (ohne die Berücksichtigung von Recycling) eine potenzielle Knappheit zu erwarten, sofern die global durchschnittliche Pro-Kopf-Nachfrage nach diesen Metallen der deutschen Nachfrage entspricht und die Produktionsmengen nicht erhöht werden. In 2030 und 2040, aber nicht mehr in 2050, fragt Deutschland einen überproportionalen Anteil nach Kupfer, Zink, Blei und Zinn nach. Nur in 2030, aber nicht mehr in 2040 und 2050, fragt Deutschland einen überproportionalen Anteil nach Aluminium, Magnesium und Nickel nach. Das Ausmaß ist deutlich geringer als in allen anderen Green-Szenarien

Die wesentlichen Faktoren für den Rückgang der Rohstoffnachfrage sind:

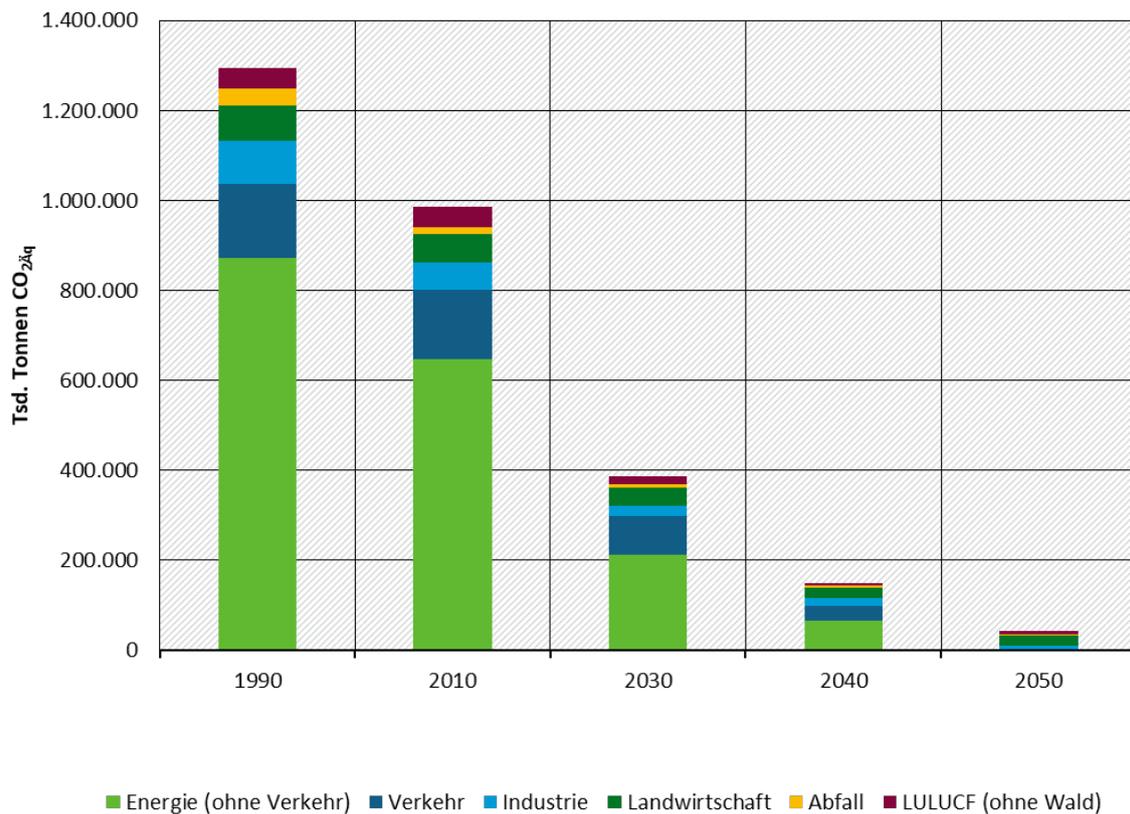
- ▶ Die Substitution der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Energien bzw. synthetische Rohstoffe
- ▶ Die Substitution von Primärrohstoffen durch biotische Rohstoffe, durch leichtere Rohstoffe und/ oder durch Sekundärrohstoffe
- ▶ Die Steigerung der Materialeffizienz in Industrien und Dienstleistungen
- ▶ Die Nutzung rohstoffsparender Technologien und die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten
- ▶ Die Reduktion der Nachfrage nach einer Vielzahl von Gütern und Dienstleistungen, ausgehend von einer geänderten Konsumentennachfrage; rohstofflich relevant ist der Rückgang der Wohnraumnachfrage und in Verbindung damit die rückläufige neue (zu erschließende) Siedlungsfläche und auch die Nachfrage nach privaten PKWs. Die Wachstumsbefreiung, die im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien angenommen wurde, wirkt insbesondere Rebound-Effekten entgegen.

### **Treibhausgasemissionen**

Im GreenSupreme-Szenario sinken die THG-Emissionen – gerechnet nach NIR – auf 42,915 Mio. t CO<sub>2Aq</sub> in 2050 und gehen damit um 96,7 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück (Abbildung Z-4). Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 70 % [88,4 %]. In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr,

emissionsneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Die zweithöchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (84,6 %). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 „nur“ um 49 % gegenüber 1990 zurückgehen. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 93,4 %, 85,6 % und 89,6 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit „nur“ -70 %. In 2050 ist unter Einbeziehung natürlicher Senken Treibhausgasneutralität, also maximal Netto Null-THG-Emissionen, sicher erreichbar.

**Abbildung Z- 4: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050**



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

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen auch weltweit rückläufige Treibhausgasemissionen. Diese liegen – gerechnet gemäß dem Konzept der Umweltökonomischen Gesamtrechnung – in 2050 [2030/2040] nur noch bei 33 [392/160] Mio. t CO<sub>2</sub>Äq was einem Rückgang von 96,6 % gegenüber 2010 entspricht. In den Stützjahren dominieren die energiebedingten Treibhausgasemissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen, die annahmegemäß null betragen.

Im GreenSupreme-Szenario entstehen weniger Treibhausgasemissionen als in allen anderen Green-Szenarien. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 20,5 % [24,8 %/41,7 %] weniger Treibhausgase nach NIR (einschl. LULUCF ohne Wald) emittiert als beispielsweise in GreenEe1. Die Reduktion der Produktionsmengen auf die Treibhausgasreduktion ist ein Faktor, der insbesondere auf die Reduktion der THG-Emissionen in den Quellgruppen Industrie, Energie und Verkehr Auswirkungen hat. Auf die zusätzlichen Änderungen der ressourceneffizienten

Technologien und Lebensstile gehen die Reduktionen der Treibhausgasemissionen insbesondere in den Quellgruppen Landwirtschaft und Abfall zurück. Die technologischen Änderungen und die Änderung der Lebensstile reduzieren die THG-Emissionen vor allem im Verkehr. In 2050 [2030/2040] liegen die THG-Emissionen nach NIR (einschl. LULUCF ohne Wald) um 9,9 % [22,7 %/ 38,0 %] niedriger als in GreenEe2.

Zwischen 2017 und 2050 werden in GreenSupreme weitere 12,58 Mrd. t CO<sub>2</sub>Äq emittiert. Der Großteil von 9,1 Mrd. t entsteht im Zeitraum bis 2030. In keinem anderen Green-Szenario liegen die kumulierten Treibhausgasemissionen so niedrig wie in GreenSupreme. Im Vergleich zu GreenEe1 [GreenEe2] werden beispielsweise bis 2050 insgesamt 2,67 [2,31] Mrd. t CO<sub>2</sub>Äq weniger Treibhausgase emittiert. Dies gilt insbesondere auch für den Pfad. So liegen bereits in 2030 die kumulierten THG-Emissionen in GreenSupreme 0,96 [0,85] Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>Äq unter den THG-Emissionen in GreenEe1 [GreenEe2].

Die wesentlichen, „großen“ Stellschrauben für den Rückgang der THG-Emissionen sind:

- ▶ Die Transformation des Energiesystems und dabei insbesondere die Umstellung auf erneuerbare Energien über alle Sektoren hinweg, einschließlich einer intelligenten Kopplung der Sektoren
- ▶ Die Reduktion des Energiebedarfs und die Reduktion der Nachfrage nach einer Vielzahl von Gütern und Dienstleistungen
- ▶ Die Umstellung emissionsintensiver Industrieprozesse auf emissionsärmere bzw. emissionsfreie Verfahren, oftmals einhergehend mit der stärkeren Nutzung von Sekundärrohstoffen
- ▶ Die Reduktion der Produktionsmengen, insbesondere von emissionsintensiven Halbwaren und Produkten in Folge des Rückgangs der inländischen Nachfrage, der Substitution durch emissionsfreie Produkte und der ressourceneffizienteren Nutzung der Halbwaren und Produkte
- ▶ Die Umstellung der Ernährungsweise, einschließlich der Reduktion tierischer Anteile in der Ernährung und der Vermeidung von Abfällen

Gleichzeitig tragen sehr viele, teilweise auch recht kleinteilige Änderungen zum Rückgang der Treibhausgasemissionen bei. Diese „kleinen“ Änderungen werden umso sichtbarer, wenn die „großen“ Hebel berücksichtigt wurden.

GreenSupreme ist das Szenario, das die geringsten kumulierten Treibhausgasemissionen aufweist. Es zeigt, dass ambitionierte Änderungen in allen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft einschl. Politik erforderlich sind und zusammenwirken müssen, um die Treibhausgasemissionen schnell und stark zu mindern und in Folge den Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bremsen und limitieren zu können.

## 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](http://www.uba.de/rescue-projekt). This report documents the scenario „Germany – Resource -Efficient and Greenhouse Gas-Neutral – Minimizing future GHG emissions and raw material consumption”, in short GreenSupreme.

**Table Z- 2: Comparing the level of ambition of the Green-scenarios**

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

Source: own illustration based on UBA (2019a)

## **Narrative of the GreenSupreme scenario**

As all Green scenarios, GreenSupreme describes a transformation towards a GHG-neutral Germany in 2050. GreenSupreme is characterized by rapid, ambitious changes both in terms of technological changes and in the lifestyle of people in Germany. Moreover, in contrast to all other scenarios, a liberation of growth is assumed, i.e. gross domestic product growth declines to zero by 2030 and stagnates between 2030 and 2050. For a detailed description of the narrative, see UBA (2019a).

In GreenSupreme, the use of fossil raw materials is phased out. In comparison to other Green scenarios, the exit takes place earlier. By 2030, electricity is produced entirely based on renewable energies. The switch to electricity-based technologies is faster. Even in industry, coal is no longer used by 2040.

Like GreenMe, GreenSupreme is characterized by rapidly increasing material efficiency in all sectors. This applies to both recycling and material substitutions, in particular the substitution of abiotic raw materials with biotic raw materials. As in GreenMe, resource efficiency measures are implemented by a greater share of companies from all sectors, including services. As in GreenLife, consumers change their diet by 2040. They reduce the use of greenhouse gas-intensive modes of transport and increase the use of public transport and sharing services. Demand for long-distance travel is also lower. People live in smaller apartments and increasingly buy sustainable and durable products. Compared to the GreenEe scenarios, people save additional energy and cause less waste. Products and technologies are more resource efficient and durable.

Another important element of GreenSupreme is the technological development in the rest of the world. As in GreenMe and in contrast to the other Green scenarios, a very ambitious transformation is assumed, so that in 2050 the rest of the world has caught up with climate protection efforts and technological advances in Germany and Europe.

In GreenSupreme, production quantities of important basic industries are not predetermined. Instead, they are calculated based on the assumed changes in demand. As a result, unlike to GreenEe1 and GreenLate, Germany's trade surplus does not increase in GreenSupreme.

In GreenSupreme, a liberation from economic growth is assumed. Gross domestic product growth falls to zero by 2030, after which there will be no economy-wide growth. Due to a declining population, income per person continues to rise.

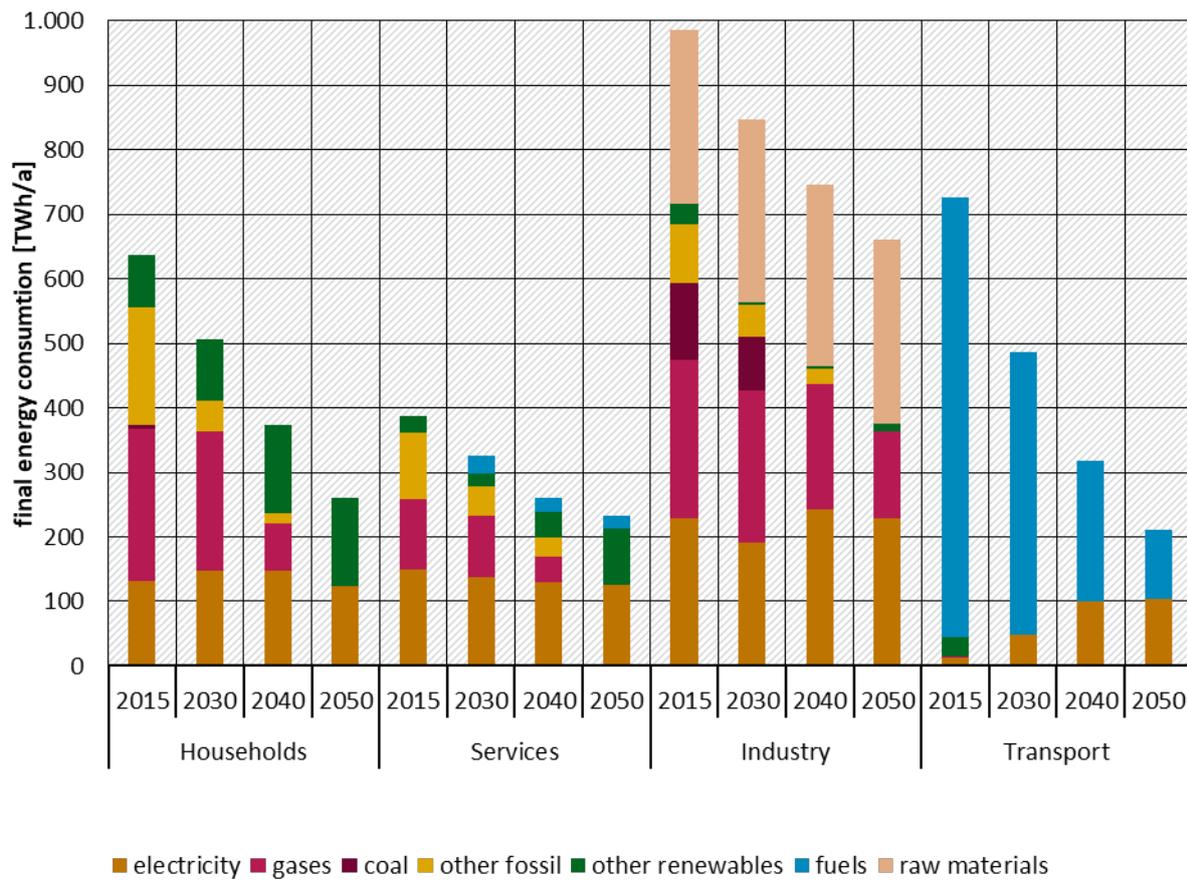
Compared to other Green scenarios, GreenSupreme describes the path with the largest technically feasible changes and the largest changes in consumer behavior assuming a rapid transformation. The results quantify the lower energy and raw material requirements and the lower greenhouse gas emissions that result from a comprehensive, ambitious and rapid transformation.

## **Main results**

### **Power**

In GreenSupreme, the final energy requirement for all application areas drops to 1,366 TWh by 2050. The largest share of 661 TWh is consumed by industry (48.4 %), 286 TWh of it for raw material use in the chemical industry, followed by private households (19.1 %), business, commerce and services (17 %) and – which is remarkable - traffic (15.5 %) in the last position.

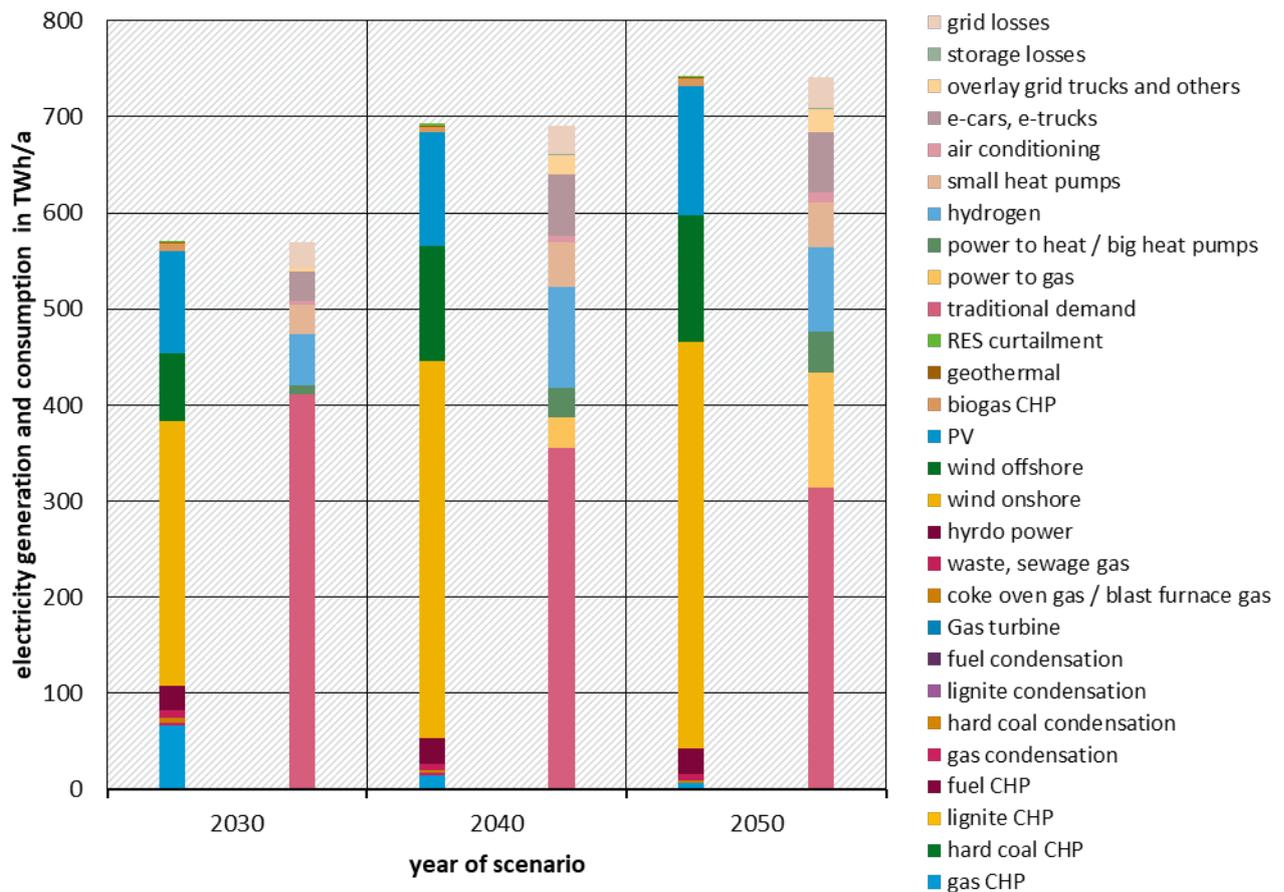
Figure Z- 1: Development of final energy demand in GreenSupreme



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

National net electricity generation increases continuously to 740.7 TWh by 2050. Electricity is produced exclusively from renewable sources in that year. Onshore and offshore wind turbines as well as photovoltaics are the dominant technologies in the transformation path. Onshore wind energy in particular can contribute large amounts to electricity generation at an early stage. National PtG generation is possible as early as 2040, as electricity generation exceeds direct electricity demand. In 2050, the installed capacity is 127.4 GW from onshore wind turbines (2040: 127.4 GW), around 30 GW from offshore wind turbines (2040: 27 GW) and 130.5 GW from photovoltaic systems (2040: 119 GW).

Figure Z- 2: Net electricity generation and consumption in Germany, GreenSupreme



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

Even if GreenSupreme cannot be compared directly with another of the GreenEe scenarios to analyze the effect of a single parameter, the general influence of material efficiency, technology innovation and lifestyle can be assessed. In the following, the focus is placed on a comparison with GreenEe2. The reduction in the production volume "zero growth" in GreenSupreme is not congruent with the "balanced trade balance" in GreenEe2, but it does provide a better point of comparison than the export surplus in GreenEe1.

The comparison with GreenEe2 shows that in the medium term a faster increase in national electricity generation is required. In the long term, however, national electricity generation is significantly lower (47 TWh). The electricity generation discontinued due to the coal phase-out in 2030 will only lead to a moderate additional installation of gas power plants. Mainly, it is compensated for by significantly more wind and PV power generation which also cover additional electricity demand in 2030. The comparison of electricity demand shows that the higher electricity demand in the medium term is mainly due to the earlier hydrogen electricity consumption in industry. Electricity demand of electromobility and heat pumps, on the other hand, is moderately higher in the medium term, since the higher penetration of the technologies slightly outweighs the consumption savings. Due to the larger expansion of renewable energies, in 2040, more "surplus electricity" is available for PtH applications and PtG can also be produced in Germany. In the long term, electricity demand in GreenSupreme is lower than in the remaining Green scenarios.

Compared to GreenEe2, long-term fuel requirements are significantly lower (in 2050: -98 TWh). There are significant savings due to lifestyle changes, zero economic growth and efficiency increases. In GreenSupreme, less electricity is used in direct applications. Therefore, the cost-effective generation potential can be used to generate more national PtG/L than in the remaining Green scenarios. Nevertheless, there is a saturation due to the higher PV costs (more roof areas). Due to the lower fuel consumption, import dependency for PtG/L is lower than in the other Green scenarios, the ratio of PtG/L imports to domestic production being 77.6 % while it is 81 % in GreenEe2.

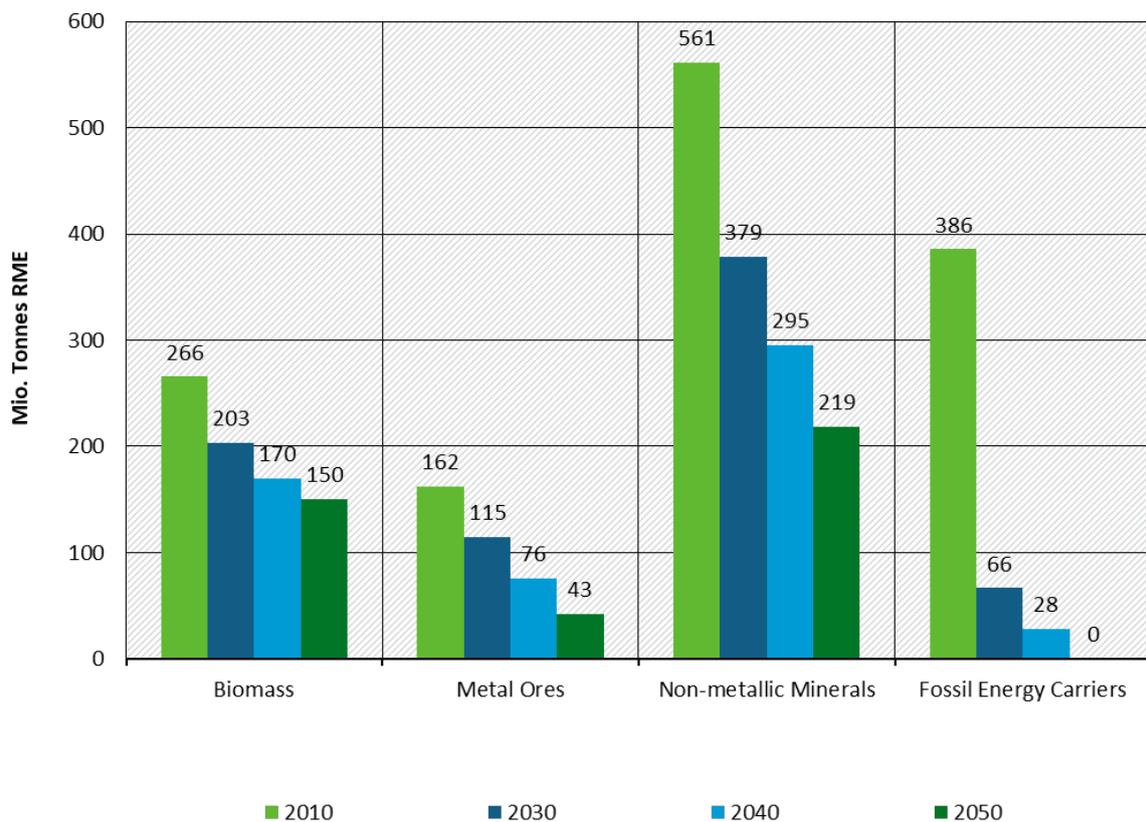
The assumptions regarding building heating correspond to the ones in Green Life. As in the other Green scenarios, the living space per capita continues to rise until 2030. However, it will be at a lower level in 2030 with 46 m<sup>2</sup> per capita and it will decrease to 41 m<sup>2</sup> per capita by 2050. Total living space declines to just under 3 billion m<sup>2</sup> by 2050, being around 15 % lower than in the GreenEe scenarios. Final energy consumption for heating in residential buildings is 20 % lower. This is mainly due to less total living space and a greater role of apartment buildings (MFH) opposed to one- and two-family homes (EFH). Since the differences for non-residential buildings are small, total energy consumption for all buildings is 15 % lower than in the GreenEe scenarios. Due to the higher proportion of apartment buildings and urbanization, the share of district heating increases from 20 % to 24 %. The remaining buildings are supplied with heat pumps, with the market ramping up as quickly as possible.

In 2050, final energy demand of the transport sector is 208 TWh, 156 TWh for national traffic and 52 TWh for international traffic. The decline is very sharp due to very ambitious assumptions regarding both modal shift/avoidance and electrification. Electricity demand for motorized private transport (67 TWh in 2050 vs. 384 TWh in 2010) is only slightly higher than demand for road freight transport (57 TWh in 2050 vs. 193 TWh in 2010), followed by international air traffic (42 TWh in 2050 vs. 87 TWh in 2010). Compared to the GreenEe scenarios, air traffic volume is almost halved leading to a sharp decline even without the option of electrification. Final energy demand of national transport reduces by 10 % in 2030 and 25 % by 2050. In international transport, the measures lead to energy savings of 11 % (2030) and 43 % (2050). While electricity demand is only 10 % lower in 2050, fuel requirements (both nationally and internationally) are 43 % lower in GreenSupreme than in GreenEe2.

### **Raw material use**

The transformation in GreenSupreme leads to a 70.1 % reduction in raw material consumption (RMC) compared to 2010 to a total of 411 million tons of raw material equivalents. The greatest decline with 100 % is found in fossil fuels as fuels fossils are not used anymore, neither nationally nor abroad. The decline between 2010 and 2030 is particularly high (-82.8 %). Total RMC of non-metallic minerals decreases by 61 % between 2010 and 2050. RMC of metal ores and biomass decrease by 73.8 % and 43.5 %, respectively. The decline of RMC between 2010 and 2030 is unsteady for fossil fuels, but steady for all other raw material groups.

**Figure Z- 3: Primary raw material consumption (RMC) by raw material, 2010 to 2050**



Source: Own modeling results ifeu/EEG/SSG - URMOD

In the period from 2010 to 2030 [2030 to 2040/2040 to 2050], raw material productivity (final use / raw material input) increases by 2.7 % [2.1 % / 3.1 %] annually on average. In 2050, it is 379 index points higher than in 1994.

Per capita consumption of primary raw materials decreases to 5.72 tons per person in 2050, a 66 % decrease compared to 2010. Primary raw material consumption of private households drops to 182 million tons RME by 2050. In 2050, food is the most resource-intensive area of need with 106 million tons RME, followed by leisure and tourism (28 million tons RME) and housing and housekeeping (25 million tons RME).

Between 2010 and 2050, cumulative consumption of primary raw materials sums up to 35.1 billion tons RME. Non-metallic minerals (46.9 %) have the largest share, followed by biomass (25.6 %) and fossil raw materials (16.8 %).

Material recycling can save a total of (at least) 206 million tons of primary raw materials in 2050, which corresponds to 33 % of total raw material consumption (primary and secondary). Compared to all other Green scenarios, the transformation in GreenSupreme leads to a lower consumption of raw materials. In 2050, RMC is 21.8 % lower than in GreenEe2. The difference is pronounced for all abiotic raw materials, and especially for fossil raw materials. As result of the lower RMC, RMC per capita is also 21.8 % lower than in GreenEe2.

In GreenSupreme, demand for all metals under study is lower in both the path and cumulatively up to 2050 than in all other Green scenarios. As a result, supply bottlenecks are less pronounced. In the path and in 2050, a potential shortage is only expected for PGM and lithium (without

taking recycling into account), provided that global average demand per capita for these metals corresponds to German demand and the production volumes are not increased. In 2030 and 2040, Germany demands a disproportionate share of copper, zinc, lead and tin. In 2030, but no longer in 2040 and 2050, Germany's demand for aluminum, magnesium and nickel is above-average. The extent of the potential scarcity is significantly lower than in all other Green scenarios

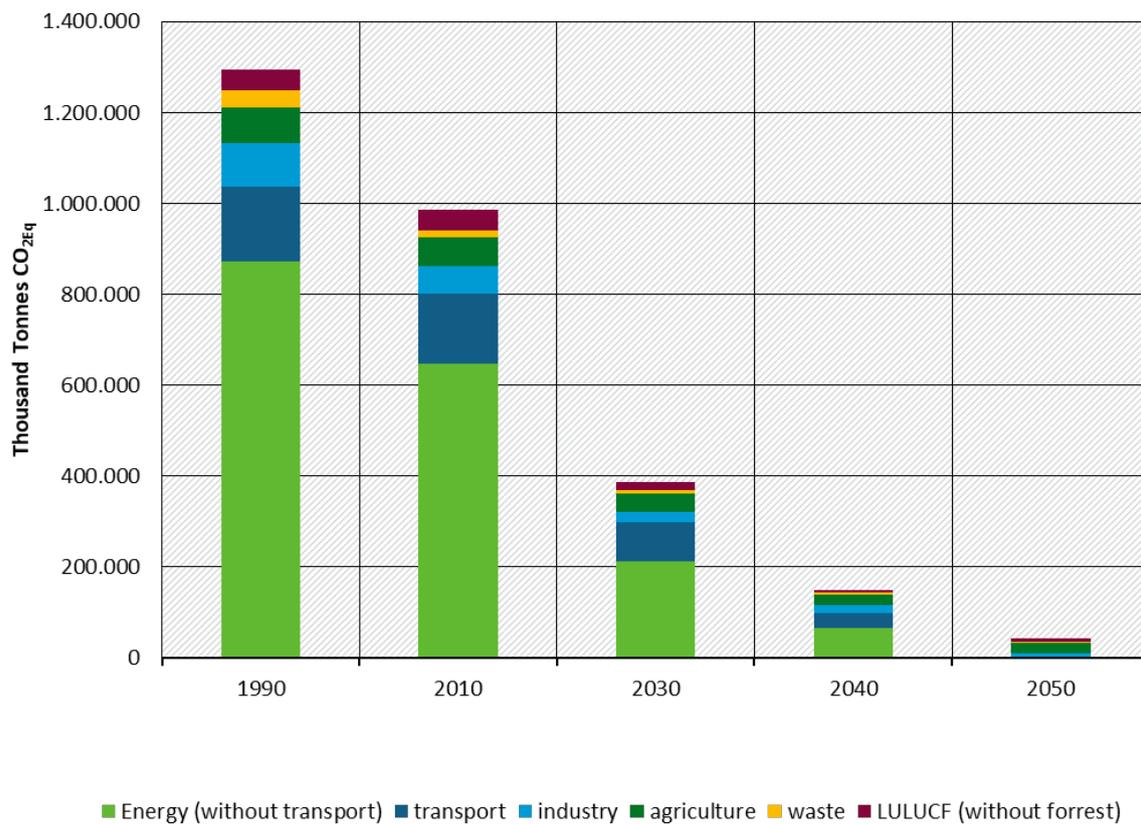
The main levers leading to a decline in raw materials demand are:

- ▶ Substitution of fossil raw materials by renewable energies or synthetic raw materials
- ▶ Substitution of primary raw materials with biomass, lighter raw materials and / or with secondary raw materials
- ▶ Increasing material efficiency in industries and services
- ▶ Use of resource-saving technologies and extension of the lifespan of products
- ▶ Reduction of the demand for a variety of goods and services based on changing patterns of consumption; the decrease in demand for living space and the associated decline in new settlement areas as well as the decline in demand for private cars are especially relevant to raw materials. The liberation from growth, which was assumed in GreenSupreme only, is able to counteract rebound effects.

### **GHG emissions**

In GreenSupreme, GHG emissions - calculated according to NIR - decrease to 42.9 million t CO<sub>2Eq</sub> in 2050 and thus decrease by -96.7 % compared to 1990 (UBA 2019a) (Figure Z- 4). By 2030 [2040], the decrease in GHG emissions is 70 % [88.4 %]. In 2050, the energy sector, including transport, is emission neutral, and the reduction since 1990 is 100 % accordingly. Waste management records the second highest decline until 2030 (84.6 %). This contrasts with agriculture where GHG emissions only decrease by 49 % until 2030 compared to 1990. GHG emissions from waste management, LULUCF (without forest) and industry also decrease sharply until 2050 with declines of 93.4 %, 85.6 % and 89.6 %. The smallest decline is found in agriculture with "only" -70 %. In 2050, greenhouse gas neutrality, i.e. net zero GHG emissions at maximum, can be achieved with certainty by including natural sinks.

**Figure Z- 4: Greenhouse gas emissions by sources, 1990 to 2050**



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

Private and public consumption and investments (Germany's final domestic use) also lead to declining global GHG emissions. In 2050 [2030/2040], emissions - calculated according to the concept of environmental-economic accounts – amount to only 33 [392/160] million t CO<sub>2eq</sub> in 2050 [2030/2040], which corresponds to a decrease of 96.6 % compared to 2010. In 2030 and 2040, energy-related GHG emissions dominate the emissions from final domestic use. Only in 2050, non-energy GHG emissions are higher than energy-related GHG emissions, which are assumed to be zero.

In GreenSupreme, fewer GHG emissions are produced than in all other Green scenarios. In 2050 [2030/2040], 20.5 % [24.8 % / 41.7 %] less GHGs are emitted according to NIR (including LULUCF without forrest) than in GreenEe1. The reduction of production volumes especially has an impact on GHG emissions from industry, energy and transport. The additional changes in resource-efficient technologies and lifestyles lead to reductions in emissions mainly from agriculture and waste. Technological changes and lifestyle changes reduce GHG emissions from traffic in particular. In 2050 [2030/2040] GHG emissions according to NIR (including LULUCF without forrest) are 9.9 % [22.7 % / 38.0 %] lower than in GreenEe2.

Between 2017 and 2050, 12.58 billion t CO<sub>2eq</sub> are emitted cumulatively in GreenSupreme. The majority of 9.1 billion t is emitted in the period up to 2030. In no other Green scenario, cumulative GHG emissions are as low as in GreenSupreme. Compared to GreenEe1 [GreenEe2], for example, 2.67 [2.31] billion t CO<sub>2eq</sub> less GHGs are emitted by 2050. This particularly applies to the path. As early as 2030, cumulative GHG emissions in GreenSupreme are 0.96 [0.85] billion tons of CO<sub>2eq</sub> below the GHG emissions in GreenEe1 [GreenEe2].

The "big" levers for the reduction of GHG emissions are:

- ▶ the transformation of the energy system and in particular the switch to renewable energies across all sectors, including an intelligent sector coupling;
- ▶ reducing energy consumption and reducing demand for a variety of goods and services;
- ▶ the conversion of emission-intensive industrial processes to lower-emission or emission-free processes, often accompanied by the increased use of secondary raw materials;
- ▶ the reduction of production volumes, especially of emission-intensive semi-finished products as a result of the decline in domestic demand, the substitution by emission-free products and a more resource-efficient use of semi-finished goods;
- ▶ the change in nutritional habits, including the consumption of fewer animal products and avoiding food waste.

At the same time, a large number of changes, some of which are very small, contribute to the reduction in greenhouse gas emissions. These “small” changes become all the more visible when the “big” levers are already accounted for.

GreenSupreme is the scenario with the lowest cumulative greenhouse gas emissions. It shows that ambitious changes in all areas of economy and society, including politics, are necessary and must work together to quickly and strongly reduce greenhouse gas emissions and consequently to slow down and limit the increase in greenhouse gas concentrations in the atmosphere.

# 1 Einleitung

## 1.1 Herausforderung Klimawandel und die Green-Szenarien

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 (IPCC 2015). Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 Grad beinhaltet, dass Deutschland den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant reduzieren und eine sogenannte Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden.

In den ersten 30 Jahren bis 2019 konnten die Treibhausgasemissionen um 35,7 % gegenüber 1990 gesenkt werden, dies entspricht einer Emissionsreduktion von 447 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>Äq 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 30 Jahren müssen weitere 742 Millionen Tonnen Treibhausgase reduziert werden, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen.

Eine Reduktion in diesem 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. 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 weitest gehende Treibhausgasneutralität sind und welche Rohstoffe in welchem Ausmaß nachgefragt werden, 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 Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Minimierung von Treibhausgas-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum, kurz: GreenSupreme.

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

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

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

## 1.2 GreenSupreme: Leitlinien und Ausrichtung

Wie alle Green-Szenarien beschreibt auch das GreenSupreme-Szenario einen Transformationspfad im Lösungsraum hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland in 2050. GreenSupreme zeichnet sich durch ambitionierte Veränderungen sowohl hinsichtlich der technologischen Umstellungen als auch im Lebensstil der Menschen in Deutschland aus. Im Szenario GreenSupreme wurde außerdem im Gegensatz zu allen anderen Szenarien eine Wachstumsbefreiung unterstellt, das heißt, dass das BIP-Wachstum bis 2030 auf null zurückgeht und zwischen 2030 und 2050 stagniert. Eine ausführliche Beschreibung des Narrativ findet sich in UBA (2019a), im Folgenden sind die wesentlichen Leitlinien aufgeführt.

Wie GreenMe zeichnet sich auch GreenSupreme durch eine sehr hohe Materialeffizienz in allen Sektoren aus. Dies betrifft die Menge der genutzten Sekundärmaterialien, die - sofern technisch möglich - im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien im Transformationspfad und im Zieljahr 2050 steigt. Dies betrifft auch Materialsubstitutionen, und hierbei insbesondere die Substitutionen von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe. Es betrifft weiterhin diverse Ressourceneffizienzanstrengungen, die in einem höheren Umfang in Unternehmen in allen Sektoren, einschließlich Dienstleistungen, umgesetzt werden.

Wie in GreenLife verändern Konsumentinnen und Konsumenten auch in GreenSupreme die Ernährungsweise sehr stark. Sie fragen nun noch weniger tierische Nahrungsmittel als in beiden GreenEe-Szenarien, GreenMe und GreenLate und noch mehr regionale Produkte nach. Menschen ändern ferner ihr Mobilitätsverhalten, sie nutzen treibhausgasintensive Verkehrsträger seltener und anstelle dessen stärker Angebote des ÖPNV und von Sharing-Diensten. Auch Fernreisen werden weniger nachgefragt. Die Menschen leben in kleineren Wohnungen und kaufen vermehrt nachhaltige Produkte. Sie sparen im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien zusätzlich Energie und verursachen weniger Abfälle.

Die Waren und Technologien sind ressourceneffizienter und langlebiger. Gleichzeitig fragen Konsumenten langlebigere Konsumgüter nach, die leichter reparierbarer sind.

Eine weitere wichtige Leitlinie in GreenSupreme ist die technologische Entwicklung im Rest der Welt. Wie in GreenMe und im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien wird eine sehr ambitionierte Umstellung angenommen, so dass in 2050 der Rest der Welt die Klimaschutzanstrengungen und technologischen Vorsprung in Deutschland und Europa aufgeholt hat.

In GreenSupreme sind die Produktionsmengen wichtiger Basisindustrien (wie Eisen & Stahl bzw. Zement), anders als in GreenEe1 und GreenLate, nicht vorgegeben, sondern sie werden auf der Basis der angenommenen Nachfrageänderungen ermittelt. Dadurch verzeichnet Deutschland, im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate, keinen ansteigenden Handelsüberschuss.

Im Unterschied zu allen anderen Green-Szenarien beginnen Umstellungen früher. Dies betrifft Umstellungen der Produktionstechnologien in den Industriesektoren, einschließlich des Energiesektors, soweit dies möglich ist. Es betrifft zudem auch die Schnelligkeit des gesellschaftlichen Wandels.

In GreenSupreme wird ferner im Unterschied zu allen anderen Green-Szenarien eine Wachstumsbefreiung angenommen. Das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts sinkt bis 2030 auf null, danach findet kein gesamtwirtschaftliches Wachstum statt. Aufgrund der rückläufigen Bevölkerung steigt das Einkommen pro Person weiterhin.

GreenSupreme beschreibt somit im Vergleich zu anderen Green-Szenarien den Pfad mit den höchsten technisch möglichen Änderungen und gleichzeitig den höchsten Änderungen des Konsumverhaltens der Menschen in Deutschland unter Berücksichtigung einer sehr schnellen Transformation. Die Ergebnisse quantifizieren die geringeren Energie- und Rohstoffbedarfe und die geringeren Treibhausgasemissionen, die sich aus einer umfassenden und hinsichtlich aller Aspekte ambitionierten Umstellung ergeben.

### **1.3 Aufbau des Berichts**

Der Bericht umfasst eine Kurzbeschreibung des methodischen Vorgehens, die Beschreibung der Annahmen und die Darstellung der Ergebnisse.

Kapitel 2 enthält eine methodische Kurzbeschreibung, die für das Verständnis des Berichts unerlässlich ist, sowie die Beschreibung der methodischen Änderungen im Vergleich zum Vorgehen in den Szenarien GreenEe1 und GreenMe.

Kapitel 3 dokumentiert die allgemeinen Annahmen. Dazu gehören Rahmenannahmen, die bereits im GreenEe-Szenario gesetzt wurden (UBA 2014) und auch für dieses Szenario gelten, und die für das Verständnis dieses Berichts hilfreich sind. Die allgemeinen Annahmen, die sich im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien 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. In GreenSupreme werden ferner Veränderungen der Konsumnachfrage angenommen, diese werden in einem eigenständigen Kapitel dargestellt. 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 zieht ein Resümee.

## 2 Methodik

Die Methodik im GreenSupreme-Szenario entspricht der des GreenEe2, GreenLife und GreenMe-Szenarios mit den unten genannten Änderungen. Die Berechnungen erfolgten grundsätzlich im Rahmen eines Modellverbundes:

- ▶ der Verkehrsbereich in TREMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/tremod/>),
- ▶ der Wärmeverbrauch in Gebäuden in GEMOD (<https://www.ifeu.de/methoden/modelle/gebaeudemodell/>),
- ▶ die Landwirtschaft in ALMOD (Website steht noch aus),
- ▶ das Energiesystem im kostenoptimierenden Energiesystemmodell SCOPE (siehe [https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/2018\\_F\\_SCOPE\\_Einzelseiten.pdf](https://www.iese.fraunhofer.de/content/dam/iese/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Broschueren/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 Wald und Waldprodukte 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.

Im Gegensatz zum Vorgehen in GreenEe1 und GreenLate wurden beim GreenEe2-, GreenMe-, GreenLife- und nun im GreenSupreme-Szenario die Output-Werte für wichtige rohstoff- und emissionsintensive Industriebereiche ermittelt. Daher wurde das Zusammenspiel der Modelle und Detailrechnungen im Vergleich zum Vorgehen in GreenEe1 und GreenLate um einen zusätzlichen, vorgelagerten Schritt ergänzt.

Das bedeutet, dass weiterhin in einem ersten Schritt die mit dem Umweltbundesamt abgestimmten Annahmen jeweils in TREMOD, GEMOD, ALMOD und in den Bereichen Abfall, LULUCF (ohne Wald) und in den übrigen Sektoren (außer Energie) modelliert bzw. berechnet wurden. Diese Informationen flossen als Vorgaben in die Berechnung der Industrieoutputs in URMOD ein. Die Informationen zur Energieversorgung und zur Industrie wurden in diesem ersten Schritt im GreenSupreme-Szenario aus GreenMe übernommen. Diese Informationen wurden in URMOD genutzt. Ausgehend von dem Basismodell für das Jahr 2010 wurde in URMOD nun die Nachfrage durch die Variation der Standardparameter „Komponenten der Endnachfrage“ und die „Inputkoeffizienten“ (Produktionstechnologie) determiniert. Die so

ermittelten Industrieoutputs waren die Basis für die Berechnung der Energie- und Emissionswerte im Sektor Industrie.

Zur Einordnung der methodischen Änderung soll der relevante Unterschied hervorgehoben werden: Bei GreenEe1 und GreenLate erfolgte in URMOD eine zusätzliche Abstimmung der eigentlich endogen ermittelten Modellergebnisse auf extern determinierte Output-Werte. Dazu mussten Parameter freihändig variiert werden. In der Regel erfolgt eine Anpassung über eine entsprechende Änderung der Endnachfragekomponente Exporte. Zur Vermeidung unplausibler Exportwerte war es aber in einigen Fällen erforderlich, auch in die Parameter „Importquote“ oder die Endnachfragekomponente „Bestandsveränderungen an Gütern“ einzugreifen. Beim GreenEe2-, GreenMe-, GreenLife- und GreenSupreme-Szenario konnte dagegen auf diese Anpassung an vorgegebene Output-Werte für die Industrie verzichtet werden.

### Exkurs: Methodisches Vorgehen zur Umsetzung der Wachstumsbefreiung

Im Szenario GreenSupreme wurde im Gegensatz zu allen anderen Szenarien eine Wachstumsbefreiung unterstellt, das heißt, dass das BIP-Wachstum bis 2030 auf null zurückgeht und zwischen 2030 und 2050 stagniert. Diese Vorgabe musste in URMOD bei der Berechnung der Output-Werte berücksichtigt werden. Dabei orientiert sich der generelle methodische Ansatz zur Implementierung der Vorgabe einer Wachstumsbefreiung für GreenSupreme an der Verfahrensweise zur Abstimmung der sonstigen Szenarien auf eine vorgegebene gesamtwirtschaftliche Wachstumsrate. Zur Erläuterung des Vorgehens wird im Folgenden zunächst das generelle Verfahren zur Abstimmung auf eine vorgegebene gesamtwirtschaftliche Wachstumsrate kurz betrachtet. Auf dieser Grundlage wird anschließend die spezielle Vorgehensweise zur Implementierung der Wachstumsbefreiungsvariante dargestellt.

Generell werden externe Vorgaben zur Entwicklung des gesamtwirtschaftlichen Wachstumsindicators Bruttoinlandsprodukts (BIP), ausgehend von der Modellogik, in URMOD näherungsweise realisiert, indem die Wachstumsvorgabe für das BIP übertragen wird auf den Modellparameter letzte Inländische Verwendung (LIV) auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Zwischen BIP und LIV besteht folgender definitorische Zusammenhang:

$$\text{BIP} = \text{LIV} + \text{Exporte} - \text{Importe} + \text{Gütersteuern} - \text{Subventionen}$$

Die Veränderungsraten des BIP und der LIV stimmen nur unter der Voraussetzung exakt überein, dass sich die Salden aus Exporten und Importen sowie aus Gütersteuern und Subventionen parallel zur LIV entwickeln. Es muss darüber hinaus die Bedingung erfüllt sein, dass die Summe der LIV der Einzelbereiche mit der vorgegebenen gesamtwirtschaftlichen LIV übereinstimmt. Damit diese Bedingung eingehalten wird, müssen die ebenfalls extern abgeleiteten Rohwerte für die LIV der einzelnen Gütergruppen auf die gesamtwirtschaftliche Vorgabe abgestimmt werden. Diese Abstimmung erfolgt grundsätzlich über eine proportionale Anpassung.

Bezogen auf URMOD und die Modellierung im Projekt RESCUE ist allerdings folgender spezielle Ansatz zu beachten: Das Modell unterscheidet zwei prinzipielle Kategorien von Produktionsbereichen, „Spezialbereiche“ und „Generalbereiche“.

Bei den „Spezialbereichen“ handelt es sich vorwiegend um material- und/oder emissionsintensive Bereiche. Die Entwicklung der Produktionstechnologie (Inputkoeffizienten) dieser Bereiche, der Komponenten der LIV (Konsum und Investitionen) und ggf. der Produktion (Output) werden durch externe Modelle, die zum RESCUE-Modellverbund gehören, determiniert. Dazu gehören beispielsweise der Energiesektor, die Verkehrssektoren, der Gebäudebereich oder die Landwirtschaft, d.h. alle Sektoren, für die spezifische Annahmen getroffen wurden und die im

Kapitel 4 in diesem Bericht explizit dargestellt werden. Alle übrigen Bereiche werden als „Generalbereiche“ bezeichnet; dazu gehören beispielsweise der Maschinenbau, Finanz- oder Wohnungsdienstleistungen oder das Gastgewerbe. Die ursprünglichen Vorgaben in GreenEe für die Entwicklung der LIV der Generalbereiche wurden der Vorgängerstudie THGND (UBA 2014) entsprechend in Anlehnung an eine Studie des WWF ((2009), Szenario Innovation 2005-2050), die Angaben zur Entwicklung der Bruttowertschöpfung nach Bereichen liefert, abgeleitet und jeweils auf die einzelnen „Generalbereiche“ übertragen.

Zur Herstellung der Konsistenz zwischen der gesamtwirtschaftlichen LIV und der LIV in den Einzelbereichen enthält das Modell eine so genannte Anpassungsschleife. Bei diesem Anpassungsverfahren werden die LIV der „Spezialbereiche“ nicht verändert, sondern die gesamte Anpassungsdifferenz wird proportional ausschließlich auf die LIV der „Generalbereiche“ übertragen.

Für die Umsetzung der Annahme der Wachstumsbefreiung wurden in Analogie an diese Verfahrensweise folgende Elemente variiert:

- Gesamtwirtschaftliches Wachstum: Die bisherige Annahme eines Anstiegs der gesamtwirtschaftlichen LIV wird durch eine Vorgabe einer Veränderung von Null ersetzt.
- Spezialbereiche: Analog zu dem bisherigen Verfahren werden spezielle externe Vorgaben zu Produktionstechnologie, LIV und Output ermittelt, die weitgehend mit einer Nullwachstumsannahme kompatibel sind.
- Generalbereiche: Die LIV der einzelnen Generalbereiche wird über die genannte Anpassungsschleife durch proportionale Abstimmung auf die gesamtwirtschaftliche Wachstumsvorgabe eines „Nullwachstums“ abgestimmt.

Der nächste Schritt im Modellverbund folgt dem Vorgehen in GreenEe1: so 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, 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, an URMOD übergeben. Eine ausführliche Beschreibung der Modelle und des Zusammenwirkens im Modellverbundes findet sich unter Dittrich et al. (2020a).

## 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. (2020a).

#### 3.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Bei der Fortschreibung der Bevölkerungszahlen wurde 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 Tabelle 2 wiedergegeben. Bis 2050 geht die Bevölkerung demnach um 12 % zurück.

**Tabelle 2: Annahmen 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

Im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien wurde angenommen, dass das gesamtwirtschaftliche Wachstum bis 2030 auf null zurückgeht und danach eine sogenannte Wachstumsbefreiung vorliegt, das heißt, dass bis 2050 kein weiteres gesamtwirtschaftliches Wachstum vorliegt (siehe auch Textbox zum methodischen Vorgehen in Kapitel 2).

Verschiedene Gründe sprechen für eine Wachstumsbefreiung (siehe beispielsweise Daly 1996; Göpel 2020; Jackson 2016; O’Neill 2012; Paech 2012; Seidl / Zahrnt 2010). In diesem Projekt waren zwei Gründe aus Sicht der Autorinnen und Autoren besonders relevant: (1) In den vorigen Szenarien waren das Wachstum und damit auch das Einkommen vorgegeben. Durch das ressourceneffizientere Produzieren und Konsumieren in GreenMe und GreenLife resultieren im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien und GreenLate zusätzliche Einsparungen, die Konsumenten und Konsumentinnen vor allem für zusätzliche Dienstleistungen ausgeben (Rebound-Effekt). Im Szenario GreenLife erreichten die Ausgaben für Dienstleistungen ein Ausmaß, das in GreenSupreme nicht mehr plausibel gesteigert werden konnte. (2) Hochrechnungen für die globale Rohstoffnachfrage unter den in GreenMe und GreenSupreme gesetzten Rahmenannahmen und unter Berücksichtigung einer nachholenden Entwicklung im Rest der Welt zeigten, dass die erforderliche Rohstoffmenge von verschiedenen Basis- und Technologiemetallen die gegenwärtig bekannten Reserven teilweise weit überstieg. Vor dem Hintergrund wurde im Projekt nach weiteren und zusätzlichen Parametern gesucht. Durch die Annahme der Wachstumsbefreiung wird insbesondere dem unter (1) beschriebenen Rebound-Effekt entgegengewirkt, dadurch kann im Ergebnis die gesamtwirtschaftliche Rohstoffnachfrage weiter gesenkt werden.

### **3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz**

Im GreenSupreme-Szenario ist die Gesamtwirtschaft im Vergleich zu GreenEe1 und GreenEe2 dynamischer und innovativer. Dies drückt sich auch in der schnelleren und breiteren 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 wie im GreenMe-Szenario durchschnittlich um 1,2 % pro Jahr wächst. Der Unterschied zu den GreenEe-Szenarien (1,1 % p.a.) oder zur Entwicklung in Deutschland (um die Effekte der Wiedervereinigung bereinigt lag der jahresdurchschnittliche Anstieg der Materialeffizienz bei rd. 1 % zwischen 2000 und 2010) mag zunächst gering erscheinen, kumuliert über die Zeit bis 2050 ist der Unterschied jedoch spürbar.

Die unterstellten Ressourceneffizienzmaßnahmen in den verschiedenen Sektoren beinhalten sehr unterschiedliche Ansätze, die von Abfallvermeidung und -verwertung in der Produktion über Prozess- und Logistikoptimierungen bis hin zu Einsparungen und neuen Geschäftsmodellen reichen. Wie bereits im GreenMe-Szenario und im Unterschied zu anderen Green-Szenarien ist die Marktdurchdringung dieser Ressourceneffizienzmaßnahmen im GreenSupreme-Szenario höher.

Im GreenSupreme-Szenario werden wie im GreenMe-Szenario im stärkeren Umfang als in den übrigen Szenarien Substitutionen von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe angenommen. Dies betrifft insbesondere den Hoch- und Tiefbau, die spezifischen Annahmen werden in Kapitel 4.5 erläutert. Ferner werden Technologien unterstellt, die im Vergleich zu den Technologieannahmen in den Green-Szenarien, außer GreenMe, rohstoffeffizienter sind. Dies gilt insbesondere für Windkraftanlagen und Photovoltaik-Anlagen. Die Annahmen werden in Kapitel 4.8.1 beschrieben.

### **3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt**

Wie in allen anderen 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 wie im GreenMe-Szenario angenommen, dass auch sie bis 2050 den technologischen Rückstand aufgeholt haben. Dies betrifft alle Annahmen zur Produktionstechnologie, einschließlich aller Ressourceneffizienzannahmen, und alle Annahmen zum Klimaschutz. Insbesondere diese zweite Annahme ist sehr ambitioniert. Sie impliziert, dass es einen internationalen Ausgleich, einschließlich Technologie- und Wissenstransfer geben wird. Sie impliziert aber gleichzeitig auch, dass Maßnahmen zum Schutz der heimischen Industrie aus Gründen eines ungleichen Klimaschutzes nicht notwendig sind.

Im Projekt RESCUE liegt der Fokus auf Deutschland. Die Annahmen zur Entwicklung in Europa und im Rest der Welt sind daher für die Berechnung der Rohstoffaufwendungen und der Treibhausgasemissionen der Importe relevant. Die Annahmen gehen davon aus, dass der Klimawandel effektiv begrenzt werden kann, wenn alle Staaten eingebunden sind und ambitionierte Transformationen global umsetzen.

### **3.1.5 Nutzung von Biomasse**

In allen Green-Szenarien wird Primärbiomasse ab 2030 ausschließlich stofflich genutzt. Biotische Abfälle können stofflich (z.B. für RC-Papier, als Ausgangsrohstoffe für die Chemie) und

energetisch genutzt werden. Die unterstellten energetischen Potenziale der biotischen Reststoffe und Abfälle sind in (siehe Dittrich et al. 2020a).

Tabelle 3 wiedergegeben. Die Herleitung wird in der Dokumentation der GreenEe-Szenarien ausführlich erläutert (siehe Dittrich et al. 2020a).

**Tabelle 3: Energetische Nutzung der Restbiomassepotenziale 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. (2020a)

### 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 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 CO<sub>2</sub>-Quellen.

Die Abscheidung und Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff mit Direct-Air-Capture-Anlagen (CCU) 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 UBA (2019a), insbesondere Seite 334f.

## 3.2 Treibhausgas-Emissionsziel 2030 und 2040

Die Emissionsziele in GreenSupreme sind gegenüber den anderen Green-Szenarien für die Stützjahre 2030 und 2040 deutlich verschärft worden. Die Reduktionsziele bezogen auf in 2030 sind 70 % und für 2040 87 %. In 2050 wird mit einer Minderung um mindestens 95 % ein ähnliches Ziel angestrebt. Erreicht wird konkret 96,7 % im Rahmen der NIR-THG-Emissionsbetrachtung. Darüber hinaus erfolgt bereits im Jahr 2030 der Ausstieg aus der Kohleverstromung, Steinkohle wird nur noch zur Leistungsabsicherung genutzt. Insbesondere hierdurch wird die höhere Einsparung im Pfad möglich.

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 prioritär nicht auf nationale Emissionsziele angerechnet. Durch den technisch maximalen Markthochlauf in GreenSupreme fallen aber im Pfad schon so hohe Importmengen an PtL an, dass diese auch schon im nationalen Verkehr verwendet werden müssen und damit die nationale Emissionsbilanz deutlich früher als in den anderen Green-Szenarien reduzieren.

## 4 Sektorale Annahmen

### 4.1 Landwirtschaft

Die Annahmen des GreenSupreme-Szenarios basieren auf denselben Annahmen wie im GreenLife-Szenario. So wird der Viehbestand in 2050 gegenüber allen anderen Green-Szenarien stärker verringert. Grundsätzlich wurden in allen Green-Szenarien die folgenden Annahmen hinterlegt, die auf THGND (UBA 2014) zurückgehen:

► **Flächenentwicklung:**

Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird durch zwei Faktoren beeinflusst: der Flächenneuanspruchnahme sowie der Wiedervernässung von Moorböden (siehe Kapitel 3.1). 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 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 Reduktion der Abfälle bis 2050 um 50 % unterstellt, und die Produktion wurde entsprechend angepasst.

Im GreenLife und GreenSupreme-Szenario werden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt (Dittrich et al. 2020b):

- Für eine ausgeglichene Handelsbilanz wird der Selbstversorgungsgrad in der Fleischproduktion auf 150 % festgelegt (in den GreenEe1- und GreenLate-Szenarien sind es 345 %).
- Der Fleischkonsum geht bis 2050 kontinuierlich zurück und orientiert sich ab 2050 an der Untergrenze der Empfehlungen der DGE (300 g / Woche) anstatt am durchschnittlichen Konsum (ca. 450 g / Woche in GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe).
- 15 % der Milchproduktion von heute wird durch in Deutschland produzierte Sojaprodukte ersetzt, was einen Rückgang der Milch- und Rindfleischproduktion zur Folge hat.

Die einzige Abweichung in GreenSupreme gegenüber dem GreenLife-Szenario besteht im Pfadverlauf. So wird angenommen, dass sämtliche Ziele für das Zieljahr 2050 (Anteil Ökolandbau, Viehbestand, Abfälle) bereits im Jahr 2040 erreicht werden. Für den Pfadverlauf wird unterstellt, dass zwischen 2020 und 2040 eine lineare Entwicklung stattfindet.

Die entsprechenden Rückkopplungen auf die Nahrungsmittelindustrie (bedingt durch veränderte Fleisch- und Milchmengen) werden berücksichtigt (s. Kapitel 4.3.9).

Die Entwicklung der Viehbestände im GreenSupreme-Szenario ist in Tabelle 4 zusammengefasst.

**Tabelle 4: Entwicklung der Viehbestände im GreenSupreme-Szenario**

Tierplatzzahlen [Mio.]	2010	2030	2040	2050
Milchkühe	4,18	3,01	1,83	1,83
Sonstige Rinder	8,63	5,12	1,62	1,62
Schweine	22,2	13,1	3,86	3,86
Geflügel	129	95,2	61,5	61,5
Schafe	2,39	1,59	0,79	0,79
Pferde	0,46	0,50	0,54	0,54

Quelle: eigene Analysen, ifeu

## 4.2 Flächennutzung und LULUCF

Die Flächenneuanspruchnahme entspricht im GreenSupreme-Szenario dem Verlauf in GreenLife, sie geht damit schneller als in den anderen Green-Szenarien zurück. Wie in allen Green-Szenarien werden in 2050 (netto) keine zusätzlichen Flächen für Siedlungen umgewandelt. In 2030 bzw. 2040 liegt der Wert mit 10 bzw. 5 ha pro Tag niedriger als in den GreenEe-Szenarien, GreenLate- und GreenMe-Szenario mit 20 bzw. 10 ha. In die Berechnungen der Rohstoffaufwände ist zusätzlich eingeflossen, dass weiterhin räumliche Veränderungen stattfinden können und 7 ha pro Tag aus der Nutzung genommen und an anderer Stelle neu in Anspruch genommen werden können.

Die weiteren Annahmen im GreenSupreme-Szenario bezüglich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen entsprechen denen der anderen Green-Szenarien (außer GreenLate). So verläuft die Wiedervernässung von Mooren linear und ist 2040 abgeschlossen (5 % pro Jahr ab 2020). 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 CO<sub>2</sub>Äq.

Die Annahmen zum Torfabbau sind in allen Green-Szenarien identisch (siehe Dittrich et al. (2020a)). Weitere Annahmen zur Landnutzung (Grünlandumbruch, Aufforstung, Entwaldung) entsprechen denen der GreenEe-Szenarien.

Die Nutzung von Sekundärhölzern entsprechen den Annahmen in GreenMe, sie beinhalten eine weitmögliche Kaskadennutzung von biotischen Rohstoffen, Altholz wird zu 50 % recycelt (siehe Dittrich et al. 2020a).

## 4.3 Industrie

Im Bereich Industrie ist das Ambitionsniveau in den bisherigen Szenarien im Transformationspfad (bis auf GreenLate) bereits sehr hoch. Vor dem Hintergrund des Ziels im

GreenSupreme-Szenario, die kumulierten THG-Emissionen zu reduzieren und in Anbetracht der sehr hohen THG-Emissionen bei der Nutzung von Kohle, wird im GreenSupreme-Szenario angenommen, dass diejenigen Branchen schneller transformiert werden, die Kohle als Energieträger einsetzen. Es wird unterstellt, dass ab 2040 keine Kohle mehr zur energetischen Nutzung verwendet wird. Dies bedeutet insbesondere zusätzliche Herausforderungen für die Stahl- und die Gießereiindustrie, bei denen der Technologieumbau bereits 2040 statt wie in den anderen Green-Szenarien 2050 abgeschlossen ist. Für Branchen, die früher auf Kohlefeuerung verzichten, wird für die entsprechenden Energieverbrauchsmengen unterstellt, dass für diese eine beschleunigte Transformation zu THG-neutralen Energieträgern (bevorzugt PtH) erfolgt. Für alle Branchen werden ansonsten die ambitioniertesten Annahmen aus den Szenarien GreenMe und GreenLife übernommen; falls keine spezifischen Annahmen getroffen wurden, wurden die Annahmen aus GreenEe übernommen.

#### 4.3.1 Stahlindustrie

In der Stahlindustrie erfolgt in allen Green-Szenarien ein Technologieumbau, um die erforderlichen THG-Minderungen zu realisieren. 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 Direct-Reduced-Iron (DRI)-Herstellung wird Wasserstoff verwendet, der national produziert wird (siehe Dittrich et al. 2020a). Die Wasserstoffproduktion kann dabei sowohl ortsnah 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.

Im GreenSupreme-Szenario erfolgt der Technologieumbau bereits ab 2025 und ist 2040 abgeschlossen. Hinzu kommen rückläufige Produktionsmengen, die sich aus den allgemeinen Annahmen zu Materialeffizienz und Verhaltensänderung im Konsumbereich im GreenMe- bzw. GreenLife-Szenario ergeben und über die modellendogene Rohstoffberechnung ermittelt werden. So betragen die Produktionsmenge 2030-2040-2050 nur noch 40,5-35,8-31,7 Mio. Tonnen. Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 5.

**Tabelle 5: Annahmen Stahlindustrie**

	Annahmen
Schrotanteil	▶ 67 % bereits ab 2040 erreicht, lineare Steigerung ab 2025
Technologieumbau	▶ linearer Rückbau Oxygenstahlroute ab 2025 bis 2040 (2025-2030-2040: 25-17-0 Mio. t Oxygenstahl) ▶ ausgleichend früherer Aufbau DRI-Anlagen (2030-2040-2050: 8-16-14 Mio. t DRI) mit Wasserstoff als Reduktionsmittel
Endenergieverbrauch (EEV)	▶ Verzicht auf Kohlenstaub bereits ab 2025 ▶ linear bis 2040 mit entsprechendem Strommehrbedarf, ansonsten wie GreenEe

Quelle: eigene Zusammenstellung

Bei den verbleibenden THG-Emissionen handelt es sich entsprechend der Annahmen um THG-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand.

Energiebedingte THG-Emissionen in der Stahlindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig reduziert. Die Produktions- und Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien geringeren Endenergieverbrauch, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 86,3 [127,5/98,0] TWh liegt. Der Anteil Strom liegt in denselben Jahren bei 86,3 [49,8/92,9] TWh.

#### 4.3.2 Nicht-Eisen-Metallindustrie

Für die NE-Metallindustrie wurden die Metalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink untersucht. Im GreenEe1 und GreenLate-Szenario ist für die jährlichen Produktionsmengen pauschal ein Wachstum von 0,7 % p.a. angenommen. In GreenSupreme wird sie wie in den übrigen Green-Szenarien modellendogen ermittelt und liegen bei 6,6 – 6,7 – 6,5 Mio. Tonnen in 2030 – 2040 - 2050. Die wesentlichen Veränderungen gegenüber heute in der NE-Metallindustrie sind die anteilige Umstellung auf strombetriebene Induktionsöfen, die Effizienzsteigerungen und die Steigerung der Sekundärerzeugung.

Im GreenSupreme-Szenario ändern sich die absoluten Angaben und Werte zum einen entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen, zum anderen erfolgt eine frühere Umstellung auf inerte Anoden und synthetischen Kohlenstoff als Reduktionsmittel. Die wesentlichen Annahmen in GreenSupreme zeigt Tabelle 6.

**Tabelle 6: Annahmen NE-Metallindustrie**

GreenEe	GreenSupreme
Sekundäranteil Kupfer, Aluminium, Blei und Zink	▶ Sekundäranteil gesamt Anstieg 2030-2040-2050: 62 %-78 %-90 % (3,35 Mio. t in 2050) für Cu, Al, Pb und Zn
Sekundäranteil weitere Nicht-Eisen-Metalle	▶ Steigerung des Sekundäranteils von Au, Ag, Pt, Ni, Sn, W, Ta, Mg, Ti, Cr, Mn linear um 25 % in 2050 ggü. 2010
Technologieumbau	▶ Nach 2030 lineare Umstellung gasbefeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene Induktionsöfen (Stromanteil Primärerzeugung konstant); in 2050 Anteil Strom für: Sekundärmetalle 65 %; Halbzeuge 65 %
Endenergieverbrauch (EEV)	▶ Effizienzsteigerung um 30 % bis 2050: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050
Emissionen	▶ Minderung durch Umstellung auf inerte Anoden bei der Primäraluminiumerzeugung, sowie durch Kohlenstoff als Reduktionsmittel für Blei (primär- und Sekundärerzeugung) und für Sekundärzinkerzeugung ▶ C bereits ab 2040 aus synthetischen Quellen (Menge abhängig von Produktionsmenge: 2040: 2,3 TWh, 2050: 2,6 TWh)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Nicht-Eisen-Metallindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig reduziert. Die Produktions- und Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen geringeren Endenergieverbrauch im GreenSupreme-Szenario im Vergleich zu

den anderen Green-Szenarien, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 10,1 [16,6/13,1] TWh liegt. Der Stromanteil beträgt in denselben Jahren 6,9 [10,9 / 8,5] TWh.

### 4.3.3 Gießereiindustrie

Für die Gießereiindustrie ist im GreenEe1 und GreenLate-Szenario 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. In GreenSupreme wird sie wie in den übrigen Green-Szenarien modellendogen ermittelt. Die Produktionsmengen liegen bei insgesamt 3,0 [4,3/3,9] Mio. Tonnen in 2050 [2030 / 2040]. Hieraus resultieren die wesentlichen Veränderungen in der Gießereiindustrie anteilig bei der Umstellung von fossil befeuerten Schmelzöfen auf strombetriebene, die Effizienzsteigerung und Steigerung der Metallausbringung. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch (siehe Dittrich et al. 2020a).

Im GreenSupreme-Szenario erfolgt der Technologieumbau bereits ab 2025 und ist 2040 abgeschlossen und es erfolgt eine frühere Umstellung auf synthetischen Kohlenstoff als Aufkohlungsmittel. Hinzu kommen rückläufige Produktionsmengen, die sich aus den allgemeinen Annahmen zu Materialeffizienz und Verhaltensänderung im Konsumbereich im GreenMe- bzw. GreenLife-Szenario ergeben und über die modellendogene Rohstoffberechnung ermittelt werden. Die wesentlichen Annahmen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7: Annahmen Gießereiindustrie**

	GreenSupreme
Metallausbringung	▶ Steigerung auf 90 % in 2050 (Ausgangswert 65 %)
Technologieumbau	▶ Umstellung 1/3 fossil befeuerter Schmelzöfen auf strombetriebene bereits bis 2025, danach linear und bis 2040 abgeschlossen
Endenergieverbrauch (EEV)	▶ Lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs auf 47 % des Ausgangswertes
Prozessbedingte THG-Emissionen	▶ Keine. C als Aufkohlungsmittel bereits ab 2040 aus synthetischen Quellen; Menge ist abhängig von Produktionsmenge: 2040: 1,6 TWh, 2050: 1,3 TWh

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Gießereiindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Produktions- und Verhaltensänderung und die Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen geringeren Endenergieverbrauch im GreenSupreme-Szenario im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 2,7 [5,9/3,3] TWh liegt. Der Anteil Strom beträgt in denselben Jahren 2,7 [3,9/3,3] TWh.

### 4.3.4 Chemische Industrie

Für die chemische Industrie wurde, basierend auf THGND (UBA 2014) ein im Vergleich zur restlichen industriellen Produktion ein t erhöhtes Wachstum von 2.2 % pro Jahr angenommen. Dementsprechend erfolgt nach dem Szenariennarrativ eine Überschätzung des Bedarf, welche sich auf das Gesamtenergiesystem als konservative Betrachtung auswirkt, siehe dazu TextBox 5-2 Einfluss der nicht-energetischen Bedarfe an Energieträgern in UBA (2019a). 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:
  - Ammoniak-Produktion aus elektrolytisch erzeugtem H<sub>2</sub> anstelle von H<sub>2</sub> aus Dampfreformierung von Methan
  - Industrieruß-Herstellung aus Kohlenwasserstoffen basierend auf PtG/PtL-Synthesen
  - 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)
  - Wasserstoff für chemische Reaktionen (z.B. Hydrierungen) wird elektrolytisch gewonnen
  - Einsatz von PtG-Methan als Rohstoff und Brennstoff für Hochtemperatur-Anwendungen
- ▶ Flächendeckende Anwendung Bester Verfügbarer Technik (BVT) für die N<sub>2</sub>O-Abscheidung in der Salpetersäure- und Adipinsäure-Herstellung (>98 % Abscheidung von N<sub>2</sub>O)
- ▶ Steigende Energieeffizienz von 1,5 % p.a.

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

Für das GreenSupreme-Szenario wurden die folgenden über die anderen Green-Szenarien hinaus gehenden Annahmen getroffen (Tabelle 8):

1. Verwendung von Biomasse oder biogenen Reststoffen zur Herstellung von Industrieruß und Kunststoffen.
2. Einführung eines neuen Prozesses zur Herstellung von Adipinsäure: Oxidation von Butadien mit Kohlenmonoxid, dadurch intrinsische Vermeidung von THG-Emissionen des THG N<sub>2</sub>O.

Durch den neuen Prozess der Adipinsäure-Herstellung kann die THG-Emission des Chemie-Sektors komplett auf null gesenkt werden.

**Tabelle 8: Annahmen chemische Industrie**

Bereiche	Annahmen
Ammoniak-Produktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Elektrolyse-H<sub>2</sub> statt Methan-Dampfreformierung</li> <li>▶ 2040: 37,5 % Elektrolyse-H<sub>2</sub></li> <li>▶ 2050: 100 % Elektrolyse-H<sub>2</sub></li> </ul>
Salpeter-/ Adipinsäure	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Umstellung Prozess auf CO als Oxidationsmittel (Butadien + 2 N<sub>2</sub>O/CO)</li> <li>▶ 2030: 25 %</li> <li>▶ 2040: 60 %</li> <li>▶ 2050: 100 %</li> </ul>

Bereiche	Annahmen
Industrieruß	▶ Umstellung auf erneuerbare Rohstoffe z.B. (Rest-)Holz oder PtL
Sonstige THG-Emissionsquellen	▶ Pauschale Annahme: lineare Abnahme THG-Emissionen
Kunststoffe	▶ Umstellung auf PtL-Methanol als Rohstoff, zusätzlich Biomasse/C-haltige Abfallströme Umwandeln in EtOH → Ethylen/Propylen/BTX
Kunststoffrecycling	▶ Steigerung des werkstofflichen Recyclings (inkl. Pre-Consumer-Mengen) auf 58/66/75 % in 2030/2040/2050
Allgemeine Annahmen Chem. Industrie (indirekte THG-Emissionen)	▶ Steigende Energieeffizienz (1,5 %/a) PtG-Methan als Rohstoff H <sub>2</sub> aus Elektrolyse

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Chemischen Industrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Der Endenergieverbrauch im GreenSupreme-Szenario liegt im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 84,7 [142,6/105,2] TWh. Der Anteil Strom beträgt in denselben Jahren 54,5 [48,6/63,2] TWh. Hinzu kommt der Energieaufwand für die Produktion der Rohstoffe (Kapitel 5.1.5).

#### 4.3.5 Zementindustrie

In der Zementindustrie erfolgt in allen Green-Szenarien außer GreenLate ein Technologieumbau durch die Einführung von neuartigen zementähnlichen Bindemitteln, die nur 1/3 der prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Entsäuerung von Kalkstein verursachen, da zu deren Herstellung entsprechend geringere Mengen an Kalkstein benötigt werden. Zudem kann für die neuartigen Bindemittel bis 2050 eine höhere Reduktion des spezifischen Energiebedarfs gegenüber dem Ausgangswert für konventionelle Bindemittel erreicht werden als für die konventionellen Bindemittel selbst, und der thermische Energiebedarf für die Herstellung neuartiger Bindemittel wird zu 50 % durch Strom gedeckt (sonst Gas). Des Weiteren erfolgt ein Technologieumbau bei der Herstellung konventioneller Bindemittel durch die Umstellung der Drehrohrofenfeuerung von Koks bzw. Kohle (sowie EBS) auf Gas. Außerdem wird ein Anstieg des Klinkerfaktors auf 0,9 angenommen, um durch die vermehrte Klinkerproduktion anteilig die entstehenden Fehlmengen an Hüttensand aus der Stahlindustrie zu kompensieren (siehe Dittrich et al. 2020a).

Im GreenSupreme-Szenario wird die Entwicklung der Produktionsmengen wie in den übrigen Green-Szenarien, außer GreenEe1 und GreenLate, modellendogen ermittelt, die Produktionsmengen liegen bei 16,3 [21,2/18,6] Mio. t in 2050 [2030/2040]. Die Produktion variiert entsprechend der charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Szenarien. Weitere Änderungen ergeben sich indirekt. Durch den vorgezogenen Rückbau der Oxygenstahlindustrie entfallen auch Hüttensandmengen für die Zementindustrie vorzeitig. Insbesondere im Pfad sind diese Mengen durch alternative Quellen auszugleichen (2030 etwa 2,5 Mio. t, 2040 etwa 3,4 Mio. t, 2050 etwa 1,4 Mio. t). Hierfür kommt der Einsatz von ungebranntem Kalk (vgl. (DBU 2016) oder anderen Quellen in Frage. Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 9.

**Tabelle 9: Annahmen Zementindustrie**

Bereich	Annahmen
Klinkerfaktor	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Anstieg auf 0,9 zur Kompensation von Hüttensand (Ausgangswert 0,77)</li> <li>▶ Vorzeitig entfallende Mengen an Hüttensand aus der Oxygenstahlindustrie werden durch ungebrannten Kalk oder andere Quellen kompensiert</li> </ul>
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ neuartige Bindemittel 50 % in 2050, davon 20 % in 2030 und 50 % bis 2040</li> </ul>
Brennstoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Umstellung Kohle/Koks auf Gasfeuerung, 50 % bis 2030, 100 % bis 2040; lineare Reduktion EBS auf 0 % in 2050 zugunsten Gasfeuerung</li> </ul>
Endenergieverbrauch (EEV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfes bis 2050 (Bezug Ausgangswert konventionelle Bindemittel):</li> <li>▶ thermischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 10 % und neuartige Bindemittel um 50 %</li> <li>▶ elektrischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 30 % und neuartige Bindemittel um 50 %</li> </ul>
Prozessbedingte THG-Emissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ CO<sub>2</sub>-Minderung wird erreicht durch die Einführung neuartiger Bindemittel, die den umgekehrten Anstieg durch den Anstieg des Klinkerfaktors überwiegen</li> </ul>

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Zementindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Umstellungen führen zu einem Endenergieverbrauch in Höhe von 11,8 [16,1/14,4] TWh im Jahr 2050 [2030/2040], der Anteil Strom liegt bei 3,0 [2,0/2,3] TWh in denselben Jahren.

#### 4.3.6 Kalkindustrie

Für die Kalkindustrie ergibt sich ein im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien beschleunigter Rückgang des Bedarfs an Branntkalk bedingt durch den Rückbau von Kohlekraftwerken und Oxygenstahlwerken. Der Bedarf an Dolomitmalk bleibt konstant. Die wesentlichen Veränderungen in der Kalkindustrie bestehen im Technologieumbau durch die Umstellung der Kohlefeuerung auf Gasfeuerung und durch Effizienzsteigerungen.

Im GreenSupreme-Szenario ändern sich die absoluten Angaben und Werte entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen, die in 2050 [2030/2040] bei 16,3 [21,2 / 18,3] Mio. Tonnen liegt. Die wesentlichen Annahmen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

**Tabelle 10: Annahmen Kalkindustrie**

Bereich	Annahmen
Technologieumbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Brennstoffumstellung von Kohle auf Gasfeuerung: 50 % bis 2030, 100 % bis 2040</li> </ul>
Endenergieverbrauch (EEV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050: Brennstoff linear um 20 %, elektrisch linear um 10 %</li> </ul>

Bereich	Annahmen
prozessbedingte THG-Emissionen	▶ Minderung durch Rückgang Branntkalkproduktion (CO <sub>2</sub> aus Entsäuerung)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Kalkindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen führen zu einem Endenergieverbrauch von 3,6 [4,8/4,1] TWh in 2050 [2030/2040], der Stromanteil beträgt 0,3 [0,4/0,3] TWh.

#### 4.3.7 Glasindustrie

In der Glasindustrie ist ein Technologieumbau nötig. Es wird die Umstellung von zunächst Öl- auf Gasfeuerung und im Weiteren auf elektrische Schmelzöfen sowie die Steigerung der Energieeffizienz und des Scherbenanteils unterstellt.

Im GreenSupreme-Szenario ändern sich die absoluten Angaben und Werte entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen, die in 2050 [2030/2040] bei 6,1 [6,8/6,3] Mio. Tonnen liegen. Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 11.

**Tabelle 11: Annahmen Glasindustrie**

Bereich	Annahmen
Scherbenanteil	▶ Anstieg 2030-2040-2050: 45 %-54 %-69 %
Technologieumbau	▶ Umstellung Öl- auf Gasfeuerung bis 2030, Umstellung auf elektrische Schmelzöfen 2030-2040-2050: 10 %-30 %-100 %
Endenergieverbrauch (EEV)	▶ Reduktion des EEV bis 2030 zunächst nur durch steigenden Scherbenanteil, danach linear um 80 % bis 2050
prozessbedingte THG-Emissionen	▶ Minderung durch Steigerung Scherbenanteil (weniger CO <sub>2</sub> aus Zersetzung Carbonate bei Primärerzeugung)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Glasindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Veränderungen bewirken einen Endenergieverbrauch von 4,2 [16,7/9,0] TWh in 2050 [2030/2040], der Anteil Strom liegt bei 4,2 [8,7/4,4] TWh.

#### 4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie

Im GreenSupreme-Szenario werden alle Annahmen aus dem GreenLife-Szenario übernommen, es werden keine weiteren Annahmen getroffen. Konkret bedeutet dies, dass bei den Verpackungen Einsparungen durch einen Umstieg auf Mehrweg-Kunststoff-Verpackungen um 30 % (entspricht 4,2 Mio. t Papier) unterstellt werden. Beim Verbrauch graphischer Papiere wird unterstellt, dass sich der abnehmende Trend fortsetzt. Es wird ein allgemeiner Rückgang von 40 % angenommen (entspricht 2,4 Mio. t Papier) durch eine Umstellung auf papierlose Büros, dem Rückgang der Papierwerbung sowie einem Rückgang im Bereich von Printmedien (Presse, Zeitschriften).

Die quantitative Ausgestaltung der angepassten Produktionsmengen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

**Tabelle 12: Annahmen Zellstoff- und Papierindustrie**

Bereich	Annahmen
Produktionsmengen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Verpackungen                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produktionsrückgang um 30 % (Produktion in 2050: 9,8 Mio. t)</li> <li>- Lineare Entwicklung bis 2050</li> </ul> </li> <li>▶ Graphische Papiere                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produktionsrückgang um 40 % (Produktion in 2050: 3,6 Mio. t)</li> <li>- Lineare Entwicklung bis 2050</li> </ul> </li> </ul>

Quelle: eigene Zusammenstellung

#### 4.3.9 Nahrungsmittelindustrie

Wie bereits im GreenLife-Szenario (siehe Dittrich et al., 2020d) werden für das GreenSupreme-Szenario keine für die Nahrungsmittelindustrie spezifischen Annahmen zu Treibhausgaseinsparungen getroffen. Es werden lediglich die Verarbeitungsmengen von Fleisch und Milch angepasst, die sich aus den veränderten Produktionsniveaus im Landwirtschaftssektor ergeben (siehe Kapitel 4.1). Auch dort ist das Zieljahr 2050 identisch mit dem GreenLife-Szenario und es kommt im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien zu einem starken Rückgang der Fleisch- und Milchproduktion aufgrund der Anpassung des Selbstversorgungsgrads, des Fleischverzehrs sowie des Milchkonsums. In der Summe kommt es zu einem starken Rückgang der produzierten Fleisch- und Milchmengen auf 1,48 Mio. Tonnen bzw. 15,9 Mio. Tonnen in 2050.

Unterschiede zum GreenLife-Szenario ergeben sich aus der veränderten Pfadentwicklung. So sind im GreenSupreme-Szenario in der Landwirtschaft die Ziele für 2050 bereits in 2040 erreicht. Die restlichen Annahmen in der Nahrungsmittelindustrie bleiben gleich (siehe Dittrich et al. 2020a).

Die Eckpunkte sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

**Tabelle 13: Annahmen Nahrungsmittelindustrie**

Bereich	Annahmen
Umstellung der Energieträger auf Strom	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Reduktion des Energieträgereinsatzes bis 2030 um 30 % und Ersatz durch Strom, bis 2040 Ersatz von 70 %</li> </ul>
Effizienzsteigerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Jährliches Wachstum um 0,7 %</li> <li>▶ bis 2050 Effizienzsteigerung um Faktor zwei</li> </ul>

Quelle: eigene Zusammenstellung

#### 4.3.10 Textilindustrie

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

Für die Textilindustrie kann keine Zuordnung einer modellendogen bestimmten Produktionsmengenänderung erfolgen, so dass die Produktion in allen Green-Szenarien identisch ist.

**Tabelle 14: Annahmen Textilindustrie**

Bereich	Annahmen
Technologieumbau	▶ Umstellung Kohle-, Ölfeuerung auf Gas bis 2030, Umstellung auf Strom zur Dampferzeugung 2030-2040-2050: 70 %-85 %-100 %
Spezifischer Endenergieverbrauch (EEV)	▶ Effizienzsteigerung um 50 % bis 2050: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050
Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen	▶ Keine prozessbedingten THG-Emissionen

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Textilindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Der Endenergieverbrauch liegt bei 4,1 [6,2/5,2] TWh in 2050 [2030/2040], der Anteil Strom beträgt 4,1 [4,4/4,4] TWh.

#### 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 relevant<sup>1</sup>:

- ▶ 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 Dittrich et al. 2020a). Veränderungen ergeben sich ausschließlich durch Veränderungen der Abfallmengen, die aus den exogenen Vorgaben zur Materialeffizienz aus der Rohstoffberechnung resultieren. Im GreenSupreme-Szenario bedingen die Annahmen rückläufige 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.

<sup>1</sup> Aus Abfallverbrennung werden für Deutschland keine nicht-energetischen THG-Emissionen berichtet.

**Tabelle 15: Annahmen Abfall und Abwasser**

Bereich	Annahmen
Deponie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Kontinuierliche Minderung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 gegenüber 1990</li> <li>▶ Rückbau und aerobe Stabilisierung bei 30 % der Ablagerungen</li> </ul>
MBA/MBS	▶ kontinuierlich sinkende Abfallmenge zur Behandlung 2030-2040-2050: 88 %-82 %-77 %
Kompostierung/-Vergärung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Ab 2020 gesteigerte getrennte Erfassung der Organikabfälle und ab 2020 kontinuierlich steigender Anteil zur Vergärung</li> <li>▶ kontinuierlich sinkende Abfallmenge zur Behandlung 2030-2040-2050: 88 %-82 %-77 %</li> </ul>
Abflusslose Gruben	▶ kontinuierliche Reduzierung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 durch Erhöhung des Anschlussgrades der Bevölkerung
Kläranlagen	▶ weitergehende Reduzierung Proteinzufuhr in Anlehnung DGE-Empfehlung auf 23 kg/E/a bis 2050

Quelle: eigene Zusammenstellung

## 4.5 Gebäude

Im Folgenden werden die Inputdaten von GEMOD und anderen Quellen für SCOPE dargestellt. Der Wärmebedarf ist durch diese Berechnungen bereits bestimmt. Die Deckung der Wärmenachfrage wird als Optimierungsergebnis von SCOPE dann auf Basis dieser hier dargestellten Inputdaten in Kapitel 5.1.3 dargestellt.

### 4.5.1 Rahmenannahmen und Energienachfrage

Im GreenSupreme-Szenario wurden die Rahmenparameter und die Energienachfrage aus GreenLife übernommen (für Details siehe Dittrich et al. 2020b). Wesentliche Rahmenparameter sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Wesentliche Parameter sind neben der sehr starken Steigerung der Sanierungsrate die Reduktion der Wohnfläche und die Verstädterung mit einem höheren Anteil an Mehrfamilienhäusern.

**Tabelle 16: Wesentliche Rahmenparameter im Gebäudebereich**

Parameter	Einheit	2030	2040	2050
mittlere Sanierungsrate	%	2,5	3,3	3,9
mittlere Sanierungstiefe oder mittlerer Raumwärmebedarf	kWh/m <sup>2</sup>	52,2	30,9	24,4
mittlere Raumtemperatur	°C	19		
Wohnfläche	m <sup>2</sup>	3,66 Mrd. m <sup>2</sup>	3,36 Mrd. m <sup>2</sup>	2,96 Mrd. m <sup>2</sup>

Quelle: (Dittrich et al. 2020b)

### 4.5.2 Entwicklung des Gebäudewärmebedarfs

Die in GEMOD ermittelten Energiebedarfe sind in Tabelle 17 dargestellt. Für weitere Details wird auf den Bericht zu GreenEe und GreenLife verwiesen (siehe Dittrich et al. 2020a; b).

**Tabelle 17: Nutz- und Endenergie der Wohn- und Nichtwohngebäude in 2030, 2040 und 2050 in TWh**

Bereich	Art	2030	2040	2050
<b>Nutzenergie</b>				
Wohngebäude	RW	261,1	159,1	87,8
	WW	53,6	47,3	40,1
Nichtwohngebäude	RW	141,4	77,5	59,1
	WW	11,8	10,3	8,7
davon GDH	RW	115,9	69,6	55,7
	WW	8,3	7,2	6,1
davon Industrie	RW	25,5	7,9	3,4
	WW	3,6	3,1	2,6
<b>Endenergie</b>				
Wohngebäude	RW	295	182,2	104,9
	WW	93,8	78,3	63
Nichtwohngebäude	RW	155,2	88,4	68,4
	WW	25,3	23,7	22,5
davon GDH	RW	126,5	77,9	62,8
	WW	17,5	16,4	15,9
davon Industrie	RW	28,7	10,6	5,6
	WW	7,8	7,3	6,6

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – GEMOD

#### 4.5.3 Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes

Die Restnutzungsdauern des heutigen, überalterten Heizungsanlagenbestandes sind in GreenSupreme identisch mit den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme von GreenLate. Auch die Marktanteile der Heizungstechniken beim Austausch von alten Heizungsanlagen verlaufen in GreenSupreme bis 2050 wie in den anderen Green-Szenarien. Für weitere Details wird auf den Bericht zu GreenEe verwiesen (siehe Dittrich et al. 2020a).

#### 4.5.4 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 beinhaltet die Optimierung in SCOPE in 2030 und 2040 die Ausprägung des Anteils von Wärmepumpen gegenüber Gaskessel zwischen den exogen vorgegebenen Wärmepumpenkorridor hin zu einem Zielsystem und in allen Stützjahren die Wahl 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. Für das unterstellte maximale Versorgungspotenzial der Wärmenetzversorgung weitere Details zur Objektversorgung wird auf den Bericht zu GreenEe verwiesen (siehe Dittrich et al. 2020a).

#### **4.5.5 Rohstoffliche Annahmen im Gebäudebereich**

Die rohstofflichen Annahmen sind identisch zu den Annahmen im GreenMe-Szenario (Dittrich et al. 2020c). Im GreenMe-Szenario wurden zusätzlichen Potenziale im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien genutzten Annahmen im NA-RC-Szenario von (Deilmann et al. 2017) ermittelt, die auch in GreenSupreme unter Berücksichtigung der veränderten Wohnflächen und Gebäudestruktur übernommen wurden:

- ▶ Es wird angenommen, dass der Anteil der Holzbauweise im Neubau steigt. So steigt in 2030/2040/2050 die Holzbauweise bei den Ein- und Zweifamilienhäusern auf 40/60/80 % und bei den Mehrfamilienhäusern auf 15/30/45 %. Es wird somit in GreenSupreme angenommen, dass der bestehende Trend zur Verbreitung der Holzbauweise sich beschleunigt.
- ▶ Die stärkere Nutzung von Holz wird auch bei den Dämmmaterialien unterstellt, die in 2011 nur in 1 % der Dämmungen genutzt werden. Es wird daher angenommen, dass 20/50/70 % der Wohngebäude und 20/25/30 % der Nichtwohngebäude in 2030/2040/2050 mit holzbasierten Dämmstoffen gedämmt werden.
- ▶ Es wird zudem der Anteil von Leichtbauweisen bei Kalksandstein und Ziegelstein erhöht und angenommen, dass der Materialbedarf an Ziegel und Kalksandstein in den (nach Abzug der Holzbauweise) verbleibenden Neubauten im Wohn- und Nichtwohnbereich in allen Jahren um 10 % aufgrund von Leichtbauweise reduziert wird.
- ▶ Es wird unterstellt, dass vermehrt rohstoffsparende Fenster eingesetzt werden, die die gleiche Dämmleistung erbringen. Es wird angenommen, dass ab 2030/2040/2050 neu installierte Fenster zu 50/75/100 % durch materialeffiziente Dünnglasfenster ersetzt werden.
- ▶ Es wird ferner, unter der Annahme, dass Leitungen sachgerecht und ohne Bruch verlegt werden, eine Substitutionsrate der elektrischen Kupferkabel durch Aluminiumkabel im

Neubau von 20/50/100 % in den Jahren 2030/2040/2050 unterstellt. Die geringere Leitfähigkeit wurde durch eine höhere Dicke ausgeglichen.

Die Recyclingannahmen sind identisch zu den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme von GreenLate, da hier keine darüber hinaus gehenden Potenziale gesehen werden. Für weitere Details siehe Dittrich et al. (2020a) und (2020d).

## 4.6 Verkehr

### 4.6.1 Vermeidung und Verlagerung im Personenverkehr

In GreenSupreme wurden die gleichen Annahmen zur Entwicklung des Personenverkehrs getroffen wie im Szenario GreenLife (Dittrich et al. 2020b). In beiden Szenarien gibt es deutliche Unterschiede bei den zukünftigen Verkehrsentwicklungen gegenüber den anderen Green-Szenarien und insbesondere gegenüber GreenLate, sowohl im Alltagsverkehr als auch im Fernverkehr. Diese resultieren aus Änderungen im Mobilitätsverhalten der Bevölkerung, insbesondere:

- ▶ eine deutliche Stärkung der aktiven Mobilität (Rad- und Fußverkehr)
- ▶ eine zunehmende gemeinschaftliche Nutzung von Pkw (Ridesharing) im urbanen Raum und
- ▶ eine deutliche Reduktion von Flugreisen, sowohl privat als auch geschäftlich.

Zur Abbildung dieser Verhaltensänderungen wurden die Verkehrsentwicklungen im Personenverkehr differenziert für die Bevölkerung im urbanen und im ländlichen Raum sowie für Alltags- und Fernverkehr betrachtet. Ausgangspunkt dafür ist eine Aufteilung der heutigen Verkehrsleistungen auf urbane und ländliche Bevölkerung gemäß aktuell verfügbaren Mobilitätshebungen (Nobis / Kuhnimhof 2018). Weiterhin wurde einbezogen, dass bis zum Jahr 2050 der Anteil der Bevölkerung im ländlichen Raum durch zunehmende Urbanisierung sinkt und sich dadurch (in allen Green-Szenarien) rund 5 %-Punkte der Gesamtfahrleistung der Bevölkerung vom ländlichen in den städtischen Raum verlagern (von 37 % im ländlichen Raum auf 32 %).

**Alltagsmobilität:** Im Mobilitätsverhalten der Bevölkerung urbaner Räume im Alltag ergeben sich in GreenSupreme deutliche Veränderungen. Diese sind einerseits durch verstärkte Aktivitäten in der Stadtentwicklung (Umsetzung des Planungskonzepts „Stadt der kurzen Wege“, Stärkung des Rad- und Fußverkehrs) geprägt, andererseits durch eine starke Verschiebung von Mobilität mit eigenem Pkw zu gemeinschaftlich genutzten Pkw (Carsharing & Ridesharing). Für die Bevölkerung ländlicher Räume werden keine Veränderungen im Mobilitätsverhalten angenommen, sie sind identisch zu GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenSupreme angenommen. Hintergrund sind die großen Wegelängen und die begrenzten (zeitlichen/räumlichen) Überschneidungen von Wegstrecken. Prinzipiell wären im ländlichen Raum auch mehr Sammelfahrten in Kombination mit dem ÖPNV möglich, werden aber hier nicht quantifiziert. Detailliertere Informationen zu den Annahmen für die Nahmobilität im Alltag der urbanen Bevölkerung zeigt Tabelle 18.

**Fernmobilität:** Erhebliche Änderungen im Mobilitätsverhalten betreffen auch die Fernmobilität der Bevölkerung inkl. nationalem (und internationalem) Flugverkehr. Die Anzahl von Flugreisen nimmt stark ab: Innerhalb Deutschlands wird gar nicht mehr geflogen. Auch internationale Flugreisen werden stark reduziert, und auf nationale Urlaubsreisen durch Stärkung des hiesigen Tourismus verlagert. Dadurch sind die Verkehrsleistungen im nationalen Fernverkehr im Jahr

2050 in GreenLife und GreenSupreme insgesamt um knapp 5 % höher als in den GreenEe-Szenarien. Die Verschiebung von Privat-Pkw hin zu gemeinschaftlich genutzten Pkw in Städten hat auch Einfluss auf die Fernmobilität der urbanen Bevölkerung. Ohne Privat-Pkw-Besitz verschiebt sich der Modal-Split im Fernverkehr stark zum öffentlichen Personenfernverkehr. Während in den meisten anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenLife) die urbane Bevölkerung im Fernverkehr einen ähnlichen Modal-Split hat wie die ländliche Bevölkerung (etwa zwei Drittel mit dem Pkw), sinkt der Modal-Split-Anteil von Pkw im Fernverkehr der urbanen Bevölkerung in GreenSupreme auf ca. 40 %. Tabelle 18 gibt in der rechten Spalte eine Übersicht der GreenSupreme-Annahmen für Fernmobilität der Bevölkerung im urbanen Raum.

Tabelle 19 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Personenverkehr in GreenSupreme und GreenEe2. Insgesamt sind im Jahr 2050 die Verkehrsleistungen im nationalen Personenverkehr in GreenSupreme um 2 % höher als in den GreenEe-Szenarien, was auf die zusätzlichen nationalen Urlaubsreisen statt internationaler Urlaubsflüge zurückzuführen ist. Gleichzeitig erbringen Pkw in GreenSupreme nur ca. 50 % dieser Verkehrsleistungen (in den GreenEe-Szenarien 62 %), die Pkw-Verkehrsleistungen sind damit in GreenSupreme um 18 % niedriger als in GreenEe. Die Pkw-Fahrleistungen sind in GreenSupreme im Jahr 2050 sogar um 26 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien, wegen überwiegender Nutzung von Ridesharing-Angeboten in den Städten.

**Tabelle 18: GreenSupreme-Annahmen zur Nah- & Fernmobilität der Bevölkerung im urbanen Raum**

Nahmobilität	Fernmobilität
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Anstieg des Rad- &amp; Fußverkehrs 2010-2050 um 77 %</li> <li>▶ Der ÖPNV steigt wie in GreenEe um 47 %.</li> <li>▶ Damit sinkt in GreenSupreme die MIV-Verkehrsleistung im urbanen Alltagsverkehr 2010-2050 um 43 % und liegt im Jahr 2050 20 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien.</li> <li>▶ Insgesamt sinkt in Deutschland die MIV-Verkehrsleistung 2010-2050 um 46 % (GreenEe-Szenarien: - 35 %).</li> <li>▶ Im urbanen Pkw-Alltagsverkehr erfolgt ab 2025 eine Verschiebung von Privat-Pkw hin zu Ridesharing. Im Jahr 2050 gibt es keinen signifikanten Besitz mehr von Privat-Pkw in Städten.</li> <li>▶ Die Rahmenbedingungen sind so gesetzt, dass Ridesharing nicht zulasten öffentlicher Verkehrsmittel geht, sondern ausschließlich Pkw-Fahrten ersetzt.</li> <li>▶ Bei gleicher Verkehrsleistung sinkt die Fahrleistung der urbanen Pkw-Flotte im Alltagsverkehr bis 2050 um ca. 25 % gegenüber GreenEe-Szenarien, bedingt durch die höhere Auslastung von Ridesharing-Pkw (ca. 2,4 Personen statt 1,3 Personen) trotz zusätzlicher Leerfahrten (ca. 20 %) der Ridesharing-Pkw.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Im innerdeutschen Fernverkehr finden im Jahr 2050 keine Flugreisen mehr statt, diese werden anteilig auf bodengebundene Verkehrsmittel aufgeteilt. Diese Annahme gilt auch für die Bevölkerung im ländlichen Raum.</li> <li>▶ Die teilweise Substitution internationaler Urlaubsflüge durch Inlandsreisen bewirkt zusätzliche Urlaubsreisen im Inland. Dadurch sind im Jahr 2050 die Verkehrsleistungen im bodengebundenen Fernverkehr in GreenSupreme etwa 5 % höher als in GreenEe-Szenarien.</li> <li>▶ Im bodengebundenen Fernverkehr (Wege über 50 km) wird der Modal-Split heutiger Haushalte ohne eigenes Auto auf die gesamte Bevölkerung in urbanen Räumen übertragen.</li> <li>▶ Die Fernverkehrsleistung wird damit im Jahr 2050 in GreenSupreme jeweils zur Hälfte durch Pkw bzw. öffentlichen Verkehr (Bahn, Reise- und Fernlinienbusse) erbracht – gegenüber zwei Drittel Pkw-Anteil in GreenEe-Szenarien. Bei Pkw-Fernfahrten der urbanen Bevölkerung werden im Wesentlichen Carsharing-Pkw genutzt.</li> </ul>

Quelle: eigene Zusammenstellung

**Tabelle 19: Nationale Personenverkehrsleistungen in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

Mrd. Pkm		MIV Alltag	MIV Fern	ÖPNV	ÖPFV	Rad/Fuß	Flug national	National Gesamt
2030	GreenEe2	431	381	121	135	73	12	1.153
	GreenSupreme	411	353	121	165	93	11	1.153
2050	GreenEe2	312	277	132	139	79	12	950
	GreenSupreme	272	212	132	224	118	0	959

Quelle: eigene Analysen, ifeu

#### 4.6.2 Entwicklung der Flotten im Personenverkehr

##### Fahrzeugtechnische Entwicklungen

In GreenSupreme wird der Markthochlauf der Elektromobilität gegenüber den anderen Green-Szenarien deutlich beschleunigt. Bis zum Jahr 2030 werden 12 Mio. Elektro-Pkw im Bestand erreicht, gemäß dem in (UBA 2017) formulierten Zielwert zur Erreichung des Klimaschutzplans im Verkehr. Dazu müssen im Jahr 2030 ca. 87 % Neuzulassungsanteil von Elektro-Pkw erreicht werden. Dementsprechend wird auch ein 100 %-Neuzulassungsanteil von Elektro-Pkw bereits ca. 2035 erreicht.

Weitere Unterschiede bei fahrzeugtechnischen Entwicklungen in GreenSupreme wurden analog zu GreenMe getroffen und betreffen zum einen die eingesetzten Akkutechnologien und -größen, zum anderen wird in GreenSupreme ein verstärkter Leichtbau angenommen.

**Akkutechnologien und -größen:** Bereits in den anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenLate) wurden kontinuierliche Verbesserungen von Lithium-Ionen-Akkus sowie perspektivisch bis 2050 eine vollständige Verschiebung zu Lithium-Schwefel-Akkus angenommen. Darüberhinausgehende technologische Neuerungen zur Verringerung der Rohstoffbedarfe sind nach derzeitigem wissenschaftlichem Stand nicht absehbar. Gleichzeitig wurden recht hohe Fahrzeugreichweiten von im Mittel 150-300 km bei neuen Pkw im Jahr 2030 und 300-500 km im Jahr 2050 angesetzt, welche sich u. a. aus den Reichweitenentwicklungen bei aktuellen Fahrzeugmodellen sowie in jüngerer Vergangenheit von den Kfz-Herstellern gemachten Ankündigungen für zukünftige Modelle ableiten. In GreenSupreme wird im Unterschied dazu davon ausgegangen, dass bei einem ausreichenden Ausbau der Schnellladeinfrastruktur auch geringere Reichweiten ohne weitergehende Verhaltensänderungen bei den Pkw-Nutzern möglich sind. Daher werden die Reichweiten je nach Fahrzeuggröße und -konzept analog zu GreenMe um etwa 10-30 % ggü. den anderen Green-Szenarien reduziert. Tabelle 20 stellt die angenommenen Reichweiten neu zugelassener Elektro-Pkw gegenüber.

**Tabelle 20: Annahmen zu Reichweiten neu zugelassener Elektro-Pkw in GreenSupreme im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien**

		GreenEe-Szenarien		GreenSupreme	
		2030	2050	2030	2050
BEV	Pkw groß	300 km	500 km	300 km	400 km
	Pkw mittel	300 km	400 km	200 km	300 km

		GreenEe-Szenarien		GreenSupreme	
PHEV	Pkw klein	150 km	300 km	150 km	200 km
	Pkw groß	50 km	80 km	50 km	70 km
	Pkw mittel	50 km	80 km	40 km	60 km
	Pkw klein	50 km	80 km	40 km	60 km

Quelle: eigene Zusammenstellung

**Leichtbau:** In GreenSupreme führt verstärkter Einsatz von Leichtbau im Pkw-Bereich zu zusätzlichen Effizienzsteigerungen und einer Verringerung des Materialeinsatzes in der Kfz-Produktion. Unterschiedliche Ausprägungen von Leichtbau werden wie im Forschungsvorhaben Renewbility III (Zimmer et al. 2016) definiert (s. dort Tab. 16-3). Bereits in den anderen Green-Szenarien wurden konstruktive Leichtbauvarianten (z.B. die Materialeinsparung durch optimierte Bauweise und Einsatz hochfester Stähle) sowie Substitution von Stahl durch Aluminiumwerkstoffe angesetzt. Darüber hinaus gehende Leichtbaupotenziale bieten sich durch den Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Für GreenSupreme wird nun eine schnellere Einführung von Aluminiumleichtbau und auch CFK-Leichtbau angesetzt und dabei die Einführung eines Recyclingsystems unterstellt. Der zusätzliche Leichtbau führt je nach Pkw-Größe und Antriebskonzept zu etwa 3-5 % zusätzlichen Effizienzverbesserungen in GreenSupreme gegenüber den GreenEe-Szenarien<sup>2</sup>. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Anteile verschiedener Leichtbauausprägungen an den Pkw-Neuzulassungen bis 2050.

**Tabelle 21: Leichtbauvarianten neu zugelassener Elektro-Pkw in den GreenEe-Szenarien und GreenSupreme**

		Jahr	Kein Leichtbau	Anteil „10 % Leichtbau“	Anteil „20 % Leichtbau“	Anteil „30 % Leichtbau“
Wesentliches Substitutionsmaterial		-	-	Aluminium	Aluminium	CFK
GreenSupreme	2010	100 %	-	-	-	-
	2020	-	-	100 %	-	-
	2030	-	-	-	100 %	-
	2040	-	-	-	50 %	50 %
	2050	-	-	-	-	100 %
GreenEe1 und GreenEe2	2010	100 %	-	-	-	-
	2030	-	-	100 %	-	-
	2050	-	-	-	100 %	-

Quelle: eigene Zusammenstellung

Analog zur verstärkten Elektromobilität im Straßenverkehr wird in GreenSupreme auch die Elektrifizierung im Schienenverkehr weiter intensiviert. Bis 2050 werden nahezu 100 % Elektrotraktion im Schienenverkehr erreicht (vgl. GreenEe: SPNV: 91 %, SPFV: 99 %). Diese

<sup>2</sup> In den GreenEe-Szenarien verbessert sich der spezifische Verbrauch neuer Benzin- und Diesel-Pkw zwischen 2010 und 2030 um etwa ein Viertel. Auch bei Elektro-Pkw werden zukünftig deutliche Effizienzsteigerungen unterstellt – knapp 20 % bis 2030 sowie 25 % bis 2050.

Annahme ist konsistent mit Bestrebungen des VDV (VDV 2017) und Einschätzungen in der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie<sup>3</sup>.

### **Entwicklung der jährlichen Pkw-Neuzulassungszahlen und -Bestände**

In GreenSupreme werden für den Personenverkehr die gleichen Änderungen im Mobilitätsverhalten angenommen wie in GreenLife. Entsprechend wirken sie sich auch auf die Entwicklung von Neuzulassungszahlen und Beständen aus. Aus dem Trend zu gemeinschaftlich genutzten Pkw (Ridesharing) resultieren in GreenSupreme erhebliche Veränderungen in den Flottenumschichtungen ab 2030, diese betreffen im Wesentlichen die Flottenentwicklungen in den Städten. Da durch Ridesharing deutlich weniger Fahrzeuge für die gleiche Verkehrsleistung benötigt werden, sinkt mit zunehmender Verbreitung der Ridesharing-Nutzung die Zahl der Pkw-Neuzulassungen und damit der Pkw-Bestand. Gleichzeitig haben die Ridesharing-Pkw durch ihren beinahe Dauereinsatz eine wesentlich höhere Jahresfahrleistung als Privat-Pkw, wodurch sie deutlich früher ersetzt werden müssen und sich die Flottenumschichtung beschleunigt.

In den GreenEe-Szenarien entfällt der Pkw-Bestand im Jahr 2050 zu 82 % auf den urbanen Raum und zu 18 % auf den ländlichen Raum. Änderungen in GreenSupreme ergeben sich sowohl bei den Fahrzeugzahlen als auch bei der Größenklassenverteilung. Folgende Annahmen wurden in GreenSupreme getroffen:

- ▶ Der Markthochlauf von Ridesharing-Angeboten im urbanen Raum beginnt ab 2025 und verstärkt sich ab 2030. Bei einer täglichen Einsatzdauer von 10-12 Stunden und einem mittleren Besetzungsgrad von 2,4 Personen (ggü. 1,3 im Privat-Pkw) ersetzt 1 Ridesharing-Pkw im Alltagsverkehr (<50km Wegelänge) mind. 10 Privat-Pkw.
- ▶ Die mittlere Jahresfahrleistung eines Ridesharing-Pkw wird mit ca. 50-80.000 km/a angenommen (10-12 h täglich, 15-20 km/h mittlere Geschwindigkeit, 350 Einsatztage/a). Es wird weiterhin eine Lebensfahrleistung von 600.000 km angenommen, so dass Ridesharing-Pkw nach ca. 7-10 Jahren erneuert werden.
- ▶ Ridesharing-Pkw werden v. a. in der Alltagsmobilität (d. h. bei Wegelängen von üblicherweise unter 50 km) eingesetzt. Da die urbane Bevölkerung überwiegend keine eigenen Privat-Pkw mehr besitzt, werden Fernfahrten mit Pkw vor allem durch ergänzende Carsharing-Angebote abgedeckt.
- ▶ Ridesharing-Pkw sind mittlere und große BEV-Pkw (ähnliche Größenklassen zur heutigen Taxiflotte). Die Größenklassenverteilung in der übrigen urbanen Pkw-Flotte wird über die Anzahl von Mitfahrern und Haushaltsgrößen gemäß MiD 2017 (Nobis / Kuhnimhof 2018) sowie den Bedarf an speziellen Fahrzeugsegmenten (z. B. Wohnmobile) abgeschätzt. Daraus ergibt sich im Jahr 2050 ein Anteil von 79 % im Segment „klein“ sowie 11 % „mittel“ und 10 % „groß“.
- ▶ Die Pkw-Flotte im ländlichen Raum entwickelt sich in GreenSupreme genauso wie in den GreenEe-Szenarien.

---

<sup>3</sup> Vgl. <http://www.verkehrsbrief.de/bahnbranche-gruebelt-ueber-entdieselung-des-spnv/>

Aus diesen Annahmen heraus wurde die Anzahl der jährlich notwendigen Pkw-Neuzulassungen abgeschätzt, mittlere Überlebenskurven für Ridesharing-Pkw abgeleitet und so die in GreenSupreme resultierenden Pkw-Bestände modelliert.

- ▶ Während in den GreenEe-Szenarien die Zahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen von 3,2 Mio./a im Jahr 2030 bis zum Jahr 2050 auf etwa 2 Mio./a abnimmt, sinkt sie in GreenSupreme auf etwa 1 Mio./a.
- ▶ Der Pkw-Bestand sinkt bis 2050 in GreenSupreme auf ca. 29 Mio. und liegt damit um ein Drittel niedriger als in den GreenEe-Szenarien.
- ▶ Während der Pkw-Bestand im ländlichen Raum in allen Green-Szenarien gleich ist, kommt es im urbanen Raum zu einer Halbierung des Pkw-Bestands gegenüber den GreenEe-Szenarien.

#### **4.6.3 Vermeidung und 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. 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) wäre 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 hauptsächlich die Verkehrsmittelwahl und somit den ModalSplit der Verkehrsleistungen im Güterverkehr. Hier wurden in GreenSupreme die gleichen Annahmen getroffen wie in allen anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate: Transportmengen von Bahn und Binnenschiff wurden entsprechend der Beförderungspotenziale pro Hauptverkehrsbeziehung (Binnentransport, Empfang, Versand) und Güterabteilung gemäß Klimaschutzenszenario in (UBA 2016a) angenommen. Die Differenz der Bahn- und Binnenschifftransporte zur Gesamttransportnachfrage pro Hauptverkehrsbeziehung und Güterabteilung wird den Lkw-Transporten zugerechnet.

In GreenSupreme wurde analog zu GreenLife zusätzlich die Annahme getroffen, dass eine stärkere Regionalisierung der Wirtschaftskreisläufe bei Nahrungsmitteln im Binnentransport bis 2050 zu einer Verringerung der mittleren Transportentfernungen um 25 % gegenüber den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenLife) führt. Bei den übrigen Gütergruppen wurden keine Änderungen der Transportentfernungen angenommen, da entweder bereits stark regionale Kreisläufe vorliegen (z. B. Baustoffe, Abfälle) oder aufgrund hoher Spezialisierung (Maschinenbau) bzw. Konzentration auf wenige Großstandorte (z. B. Fahrzeugbau, chemische Industrie) keine signifikante Regionalisierung möglich ist.

Tabelle 22 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Güterverkehr in GreenSupreme und GreenEe2. Insgesamt sind in GreenSupreme die Verkehrsleistungen im Jahr 2050 um ca. 13 % niedriger als in GreenEe2. Während der Straßengüterverkehr etwa 19 % niedriger ist, sind die Verkehrsleistungen im Schienen- und Binnenschifftransport nur 4 % niedriger als in GreenEe2.

**Tabelle 22: Nationale Güterverkehrsleistungen in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

	Szenario	Straße (Mrd. tkm)	Schiene (Mrd. tkm)	Wasser (Mrd. tkm)	National Gesamt (Mrd. tkm)
2030	GreenEe2	415	171	71	656
	GreenSupreme	375	165	69	608
2050	GreenEe2	384	211	74	669
	GreenSupreme	311	202	71	584

Quelle: eigene Analysen, ifeu

#### 4.6.4 Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr

In GreenSupreme werden im Wesentlichen die gleichen Annahmen zu den Entwicklungen der Fahrzeugflotten im Güterverkehr getroffen wie in den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme von GreenLate. Dies betrifft sowohl die Markthochläufe von Elektro-Lkw in den verschiedenen Größenklassen als auch die jährlichen Effizienzverbesserungen. Für Lkw wurde eine Gewichtseinsparung durch Leichtbau pauschal angesetzt (ab 2030 Leergewichtsreduktion um 6 % bei den neuen Solo-Lkw und 10 % bei Last- und Sattelzügen sowie leichten Nutzfahrzeugen).

Unterschiede gibt es bei Oberleitungs-Lkw: In den GreenEe-Szenarien und GreenLife wurden Oberleitungs-Lkw in allen Jahren ausschließlich mit Dieselhybrid-Technologie angenommen. In GreenSupreme sind analog zu GreenMe im Jahr 2030 neu zugelassene OH-Lkw ebenfalls Dieselhybride. Bis 2050 verschieben sich die Neuzulassungen hin zu vollelektrischen Antrieben, wie in der folgenden Tabelle dargestellt.

**Tabelle 23: Anteile vollelektrischer Oberleitungs-Lkw an den Neuzulassungen in GreenSupreme**

	NZL-Anteil OH bei Last-/Sattelzügen (wie in GreenEe)	davon vollelektrisch in GreenSupreme
2040	80 %	30 %
2050	90 %	50 %

Quelle: eigene Analysen, ifeu

Die Verschiebung zu vollelektrischen Oberleitungs-Lkw führt zu einem etwas erhöhten Rohstoffbedarf für die Fahrzeugherstellung auf Grund der benötigten großen Akkus. Dennoch ist es aus energetischer Sicht sinnvoll, eine möglichst weitgehende Elektrifizierung anzustreben um den Bedarf an flüssigen Kraftstoffen, die mit sehr hohem Aufwand hergestellt werden müssen, zu verringern. Da die Herstellung der synthetischen Kraftstoffe jedoch im Ausland stattfindet, lässt sich diese Einsparung in GreenSupreme nicht vollständig abbilden.

Ergänzend wird in GreenSupreme analog zur verstärkten Elektromobilität im Straßenverkehr auch die Elektrifizierung im Schienenverkehr weiter intensiviert. Bis 2050 werden nahezu 100 % Elektrotraktion im Schienenverkehr erreicht. Im Schienengüterverkehr bedeutet das allerdings nur einen geringen Unterschied, da hier in den anderen Green-Szenarien bereits 99 % Elektrifizierung (Anteil an der Verkehrsleistung) im Jahr 2050 angenommen werden.

#### 4.6.5 Internationaler Verkehr

Im internationalen Flugverkehr werden in GreenSupreme die gleichen Annahmen wie in GreenLife getroffen und starke Verringerungen der Verkehrsnachfrage bis zum Jahr 2050 unterstellt.

- ▶ Im privaten Flugverkehr werden internationale Flugreisen bis zum Jahr 2050 um 50 % ggü. den GreenEe-Szenarien und GreenMe verringert. Davon wird die Hälfte auf Inlandsreisen im bodengebundenen Verkehr (Pkw, ÖV) verlagert.
- ▶ Bei internationalen Geschäftsreisen werden bis ins Jahr 2050 etwa 25 % der Flugverkehrsleistung ggü. den GreenEe-Szenarien und GreenMe vermieden. Eine Vermeidung kann dabei sowohl durch zunehmende Digitalisierung (z. B. virtuelle Meetings) als auch innereuropäisch durch Verlagerung auf die Schiene erreicht werden. Auf eine Quantifizierung möglicher Verlagerungen wird vor dem Hintergrund der geringen Emissionsrelevanz etwaiger damit verbundener Zunahmen des Schienenangebots verzichtet.

Folglich steigt die Verkehrsleistung im internationalen Flugverkehr im GreenSupreme zunächst von 2010 bis 2030 um 65 % (in den GreenEe-Szenarien +72 %) und sinkt anschließend deutlich, so dass diese im Jahr 2050 nur etwa 9 % höher ist als 2010. Im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien beträgt die internationale Flugverkehrsleistung in GreenSupreme im Jahr 2050 insgesamt nur 55 %.

Für zukünftige Effizienzsteigerungen im Flugverkehr wurden in allen Green-Szenarien mit Ausnahme von GreenLate die gleichen Annahmen getroffen. Die angenommene Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs pro Verkehrsleistung zwischen 2010 und 2050 um etwa 56 % entspricht dabei etwa der ICAO-Selbstverpflichtung (-2 %/a).

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 Szenarien einheitlich, es gibt keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung. Die Energieeffizienz von Seeschiffen verbessert sich in den GreenEe-Szenarien und in GreenLife angelehnt an (UBA 2016b) zwischen 2010 und 2050 um ca. 53 %. In GreenSupreme wird im gleichen Zeitraum (analog zu GreenMe) eine stärkere Effizienzverbesserung um 60 % erreicht. Diese Annahme orientiert sich am oberen Ende der Bandbreite technischer Potenziale von 40-60 %, die in der Third IMO Greenhouse Gas Study (IMO 2014) ermittelt worden ist. Sie wird lt. Aussagen in der Studie hauptsächlich durch technische Maßnahmen erreicht.

#### **Flugroutenoptimierung zur Minderung von nicht-CO<sub>2</sub>-bedingten Klimawirkungen des Flugverkehrs**

Der Flugverkehr trägt nicht nur durch seine CO<sub>2</sub>-Emissionen zu den Klimawirkungen bei. Durch Emissionen von Stickoxiden, Partikeln und Wasserdampf in großer Flughöhe werden die Ozonentstehung- sowie die Wolkenbildung beeinflusst. Diese nicht-CO<sub>2</sub>-bedingten Klimawirkungen tragen insgesamt zur Erwärmung der Atmosphäre bei. Nach aktuellen Studien sind sie mindestens genauso hoch wie die Wirkungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen (UBA 2012) und können sich bis 2050 verdreifachen (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2019).

Die Höhe der nicht-CO<sub>2</sub>-bedingten Klimawirkungen ist nicht allein von der Höhe der Emissionen abhängig, sondern wird von den atmosphärischen Bedingungen stark mitbestimmt. In kalten und feuchten Gebieten kann die Luft deutlich weniger Wasserdampf aufnehmen als in wärmeren bzw. trockeneren Gebieten. Daher bilden sich durch den Wasserdampf aus den Flugzeugtriebwerken schneller Kondensstreifen und Zirruswolken. Auch die Wirkung und Verweildauer von Stickoxiden ist von den lokalen atmosphärischen Bedingungen abhängig (BDL-Klimaschutz-Portal 2019).

Bei der Planung und Durchführung von Flügen werden bereits heute aktuelle Wetterbedingungen (Wind, Gewitter u. ä.) aus Sicherheitsgründen, zur Optimierung der Flugzeit und zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs berücksichtigt. In Forschungsvorhaben wird untersucht, in welchem Maße darüberhinausgehende Optimierungen der Flugrouten (Flughöhe, Streckenführung) durch Vermeidung von atmosphärischen Schichten mit hoher Wolkenbildung die Klimawirkungen des Flugverkehrs verringern können. In dem Vorhaben REACT4C wurde am Beispiel des Flugverkehrs über dem Nordatlantik ein Minderungspotenzial um ca. 25 % bei geringen Kostensteigerungen um weniger als 0,5 % (erhöhter Treibstoffbedarf, Flugpersonal) ermittelt. Für einzelne klimaoptimierte Routen ergeben sich bis hin zu 60 % - bei allerdings deutlich stärkeren Kostensteigerungen um 10-15 % (Grewe et al. 2014).

Aufgrund der hohen Komplexität der durch optimierte Flugrouten erreichbaren Verringerungen von nicht-CO<sub>2</sub>-bedingten Klimawirkungen des Flugverkehrs ist eine Quantifizierung im Rahmen von RESCUE nicht möglich. Weiterhin entsprechen die in RESCUE gewählten Systemgrenzen der nationalen Berichterstattung und berücksichtigen damit nur direkte Emissionen von Treibhausgasemissionen.

Maßnahmen zur Flugroutenoptimierung würden daher in den Berechnungen in GreenSupreme lediglich die leichte Erhöhung der Treibstoffverbräuche und damit verbundenen direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen abbilden, jedoch nicht die deutlich stärkeren entlastenden Wirkungen der verminderten Wolkenbildung. Es ist aber grundsätzlich davon auszugehen, dass sich durch klimaoptimierte Flugrouten signifikante zusätzliche Potenziale im internationalen Flugverkehr über die in GreenSupreme berechneten Minderungen hinaus bieten.

## 4.7 Weitere Sektoren

### 4.7.1 Sonstige THG-Emissionen

Weitere THG-Emissionen wurden im Vergleich zu GreenEe1 wie folgt variiert:

- ▶ Kopplung der sonstigen THG-Emissionen aus der Aluminium- und Magnesiumindustrie an die Veränderungen der Produktionsmengenentwicklung der Aluminium- und Magnesiumindustrie.
- ▶ Kopplung der Produktion fluorierende THG an die Veränderungen in der Produktion von Basischemikalien (ohne Düngemittel und Plastik).
- ▶ Kopplung der Aerosole und Lösemittel an die mengengewichtete Entwicklung der Basischemikalien (ohne Düngemittel und Plastik) und Hygieneartikel (Seifen, Parfüme, etc.).
- ▶ Kopplung der THG-Emissionen Anwenden von Farben und Lacken/Entfetten u. chemische Reinigung / Herstellung chemischer Produkte / andere Anwendungen von Lösemitteln an die Entwicklung der Basischemikalien (ohne Düngemittel und Plastik).

Die THG-Emissionen der sonstigen SF6-Anwendungen und sonstigen Branchen bleiben unverändert im Vergleich zu GreenEe1, da die Quellen zu divers sind. Übernommen werden ferner die Annahmen und resultierenden THG-Emissionen aus Feuerlöschmitteln, Lachgas, Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen sowie aus der Herstellung von Dämmstoffen.

#### 4.7.2 Überregionale Infrastruktur: Stromnetze

Wie bereits in GreenEe wurde die DENA Verteilnetzstudie (Deutsche Energie-Agentur DENA 2012) zugrunde gelegt und der Ausbaurahmen aus dem Bundesländerszenario mit einer Korrektur der Annahmen bei der Niederspannung entlang der spezifischen Annahmen zur Siedlungsentwicklung übernommen. Ferner wurde der Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Szenario C) und bezüglich der angegebenen Trassenlängen die Annahmen aus (Wiesen et al. 2017) übernommen, dass je Trasse drei Stromkreise geführt werden (Trassenlänge\*3=Stromkreislänge). Für das Übertrag- bzw. Hochspannungsnetz wird eine Lebensdauer von 80 Jahren unterstellt, für die Netzebene Mittelspannung und Niederspannung 40 Jahre. Es wird der Annahme aus (Wiesen et al. 2017) gefolgt und keine Unterscheidung zwischen Kabel- und Freileitung hinsichtlich der Lebensdauer vorgenommen.

Die weiteren Annahmen zum Materialbedarf für die Stromnetze wurden aus GreenMe übernommen. In GreenSupreme wird folglich angenommen, dass alle zukünftig zu bauenden Hoch- und Höchstspannungsleitungen als Freileitung gebaut werden und dass 50 % des Mittelspannungsnetzes als Freileitung gebaut wird. Im Niederspannungsbereich wird aufgrund der Akzeptanzproblematik und aufgrund der Synergieeffekte mit anderen Infrastrukturvorhaben das unterstellte Verhältnis von 90/10 nicht geändert (vgl. (Bürgerdialog Stromnetz 2017)). Der Materialbedarf für Strommasten spielt mit Blick auf den RMC zwar eine untergeordnete Rolle, kann jedoch Effizienzpotenziale liefern. Um die Möglichkeiten aufzuzeigen wurde der Anteil der Holzmasten jeweils verdoppelt und die Stahl- und Betonmasten, in Abhängigkeit zum jeweiligen Netz, entsprechend reduziert. Folglich werden für 20 % des Mittelspannungsnetzes und 8 % des Niederspannungsnetzes Holzmasten unterstellt.

Sowohl Kupfer als auch Aluminium – in Verbindung mit Stahl als Tragseile – werden als Leiter im Stromnetz eingesetzt. Kupfer weist hinsichtlich der Leitfähigkeit die besten Eigenschaften unter den verwendeten Materialien auf. Die Verwendung von Kupfer weist jedoch aufgrund der geringeren Konzentration des Metalls in den Erzen hohe KRA-Werte auf und ist somit in der Materialflusslogik nachteilig gegenüber Aluminium. Um Aluminium als Substitution zu verwenden, ist es möglich die schlechtere Leitfähigkeit von Aluminium in bestimmten Einsatzbereichen durch einen größer dimensionierten Leiterquerschnitt auszugleichen. Darauf basierend wird in GreenSupreme der Anteil von Aluminium bei den Freileitungen erhöht. Tabelle 24 zeigt eine Übersicht der getroffenen Annahmen zur Aufteilung von Kupfer- und Aluminiumbasierten Leitungen/Kabeln.

**Tabelle 24: Übersicht der Annahmen in Prozent zur Aufteilung Kupfer- und Aluminiumbasierte Leitungen/Kabel**

Netzebene	Kabel: Anteil Alu/Kupfer	Freileitung: Anteil Alu/Kupfer
Hoch- und Höchstspannung (HS)	100/0 %	100/0 %
Mittelspannung (MS)	50/50 %	80/20 %
Niederspannung (NS)	80/20 %	80/20 %

Quelle: eigene Darstellung

Als Grundlage zur Berechnung der Mengen wurde auf den spezifischen Materialbedarf von Freileitungsdraht aus MaRes AP 2.3 zurückgegriffen (Steger et al. 2011). Für Aluminiumkabel wurde ein verbleibender Bedarf an Kupfer angenommen, da in den Erdkabeln vielfach ein Kupferschirm im Kabelmantel eingebaut ist (Bürgerdialog Stromnetz 2017).

Für den Bereich Energieversorgung der Eisenbahnen und der Oberleitungs-LKW wurden wie bereits in GreenMe keine Änderungen der Materialwahl bei den Oberleitungen für Bahn und Oberleitungs-LKW im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien vorgenommen.

#### **4.7.3 Kommunale Infrastrukturen**

Wie in GreenLife erfolgte eine Anpassung aufgrund der im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien geringeren Flächenneuanspruchnahme im Pfad (Kapitel 5.4) bei den kommunalen Infrastrukturen Straßen und Wege, Wasserver- und -entsorgung sowie kommunale Strom- und IKT-Kabelinfrastrukturen. Wie in GreenMe wird zusätzlich zu den Annahmen in den GreenEe-Szenarien angenommen, dass sich Recyclingtechnologien verbessern, konkret wurde eine höhere Recyclingquote von 75 % (2030), 80 % (2040) und 90 % (2050) bei der Erneuerung von ungebundenen Schichten angenommen. Die Annahmen in den anderen Green-Szenarien wurden als bereits sehr ambitionierte rohstoffeffiziente Annahmen bewertet, so dass kein weiteres Steigerungspotenzial identifiziert werden konnte.

#### **4.7.4 Dienstleistungen und Konsumänderungen**

Die Annahmen zu Konsumänderungen entsprechen denen in GreenLife:

- ▶ **Kleidung:** es wird angenommen, dass die Nachfrage nach Kleidung und Kleidungszubehör (Accessoires etc.) gegenüber den GreenEe-Szenarien in 2050 [2030/2040] um 50 % [20 %/35 %] aufgrund von suffizientem und nachhaltigen Konsumverhalten und Sharing sinkt.
- ▶ **IKT-Geräte:** es wird angenommen, dass Menschen elektronische Geräte länger nutzen und sich für Geräte entscheiden, die reparierbar und erweiterbar sind. Das heißt, die Sättigungsgrenze für privat genutzte IKT ist erreicht, Geräte werden ersetzt, wenn sie das Ende ihrer Lebenszeit erreicht haben. Sie werden zunehmend durch multifunktionale Geräte ersetzt (ein Gerät ersetzt mehrere vorherige Geräte), gleichwohl werden neue elektronische Geräte entwickelt. Beides hält sich bezogen auf den Materialeinsatz die Waage. Es findet somit kein quantitativer Anstieg von IKT-Geräten pro Person in privaten Haushalten statt, der Materialinput stagniert. Gleichwohl steigt die Qualität, so dass die Konsumausgaben für IKT-Geräte wie in den anderen Green-Szenarien steigen.
- ▶ **Möbel, Spielzeuge und sonstige Waren:** es wird angenommen, dass sich Verbraucher und Verbraucherinnen für hochwertige, langlebige und reparierbare Konsumgüter entscheiden, und diese in der Nutzungsphase auch sorgfältiger pflegen. Die Konsumgüter weisen im Durchschnitt eine doppelt bis dreimal so lange Nutzungsdauer auf wie die durchschnittlichen Güter in 2010. Der Materialinput pro Gut sinkt entsprechend, monetär steigen die Ausgaben für diese Gütergruppen aufgrund der höheren Wertigkeit.
- ▶ **Staatliche Dienstleistungen:** es wird angenommen, dass diese nachhaltiger gestaltet werden, das heißt:

- Abfallvermeidung in allen staatlichen Großküchen und Mensen führt zu einer Reduktion von 20 % des Nahrungsmittelinputs über alle Nahrungsmittel ab 2030.
- Staatliche Küchen und Mensen in den Sektoren Bildung, Gesundheit, Sicherheit, Verteidigung, Administration und Sozialleistung stellen ihr Angebot entsprechend der in GreenLife unterstellten Konsumstrukturen bezüglich der Nahrungsmittel (siehe Kap.0) um.
- Der Papierverbrauch in allen staatlichen Sektoren außer Bildung wird durch eine konsequente Umsetzung von papierlosen Büros und geringerem nachfrageorientiertem Druck in 2050 [2030/2040] um 50 % [30 %/40 %] reduziert.
- Dienstreisen per Flugzeug entwickeln sich entlang der Annahmen in der Fernmobilität (siehe Kapitel 0). So finden keine innerdeutschen Flüge statt und auch Fernflüge werden zunehmend durch digitale Kommunikationsformen ersetzt.

#### 4.7.5 Sonstige Produktions- und Dienstleistungssektoren

Es wurde angenommen, dass die sonstige Endenergienachfrage der übrigen Sektoren proportional zum Durchschnitt der quantifizierten und oben dargestellten Industriesektoren verläuft.

Rohstoffseitig gelten die Annahmen zur Steigerung der Materialeffizienz, die in Kap. 3.1.3 dargestellt wurden, für die sonstigen Sektoren in der Industrie und in den Dienstleistungen.

### 4.8 Energieversorgung

#### 4.8.1 Festlegung verschiedener Parameter

Die grundsätzlichen Maßnahmen und Stellschrauben im Energieversorgungsbereich in GreenSupreme sind im Folgenden GreenEe gegenübergestellt. Dabei ist besonders hervorzuheben, dass bereits 2030 aus der Kohle ausgestiegen wird, dass ein schneller Markthochlauf von PtG/L-Importen erfolgt und dass der Anteil von PV gegenüber Onshore wie in GreenMe etwas reduziert wird. Die technischen Parameter sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020a) dargestellt, sie sind für die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife identisch. Der Stromtausch in Europa wurde in allen Szenarien einheitlich mit einem bilanziellen Jahressaldo von „Null“ für den deutschen Im- und Export abgebildet.

**Tabelle 25: Überblick zu Annahmen in der Energieversorgung GreenSupreme im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien**

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe-Szenarien	GreenSupreme
Kohlekraftwerke Lebensdauer	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Braunkohle 30 Jahre</li> <li>▶ Steinkohle 40 Jahre</li> <li>▶ Ab 2040 keine Kohle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Keine Braunkohlkraftwerke in 2030</li> <li>▶ Steinkohle nur als Back-Up in 2030</li> </ul>
Merit-Order fossile Kraftwerke	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 2030 Kohle vor Gas (niedrigerer CO<sub>2</sub>-Preis im ETS)</li> <li>▶ 2040 keine Beeinflussung der Merit-Order (fuel switch)</li> </ul>	▶ entfällt

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe-Szenarien	GreenSupreme
EE-Potentiale & Markthochlauf	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Mindestleistung Offshore langfristig 32 GW</li> <li>▶ 2050 freier Zubau von Wind onshore und PV</li> <li>▶ daraus abgeleitet für 2030 und 2040 Korridor mit 0 % Überbauung<sup>4</sup></li> </ul>	
Überbauung der langfristigen Repoweringrate WEA	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 20 Jahre Lebensdauer für alle Bauteile</li> <li>▶ Keine Überbauung</li> <li>▶ mit 30 %/a Marktwachstum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 20 Jahre für Generatoren und 40 Jahre für Türme</li> <li>▶ Aber keine Änderung gegenüber GreenEe Markthochlaufs-Charakteristik</li> </ul>
Überbauung der langfristigen Repoweringrate PV	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 25 Jahre Lebensdauer</li> <li>▶ Keine Überbauung mit 50 %/a Marktwachstum</li> </ul>	
PtG/L-Importe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 15 % Überbauung</li> <li>▶ Preis: 2030: 154,3 €/MWh, 2040: 136,2 €/MWh, 2050: 118,2 €/MWh</li> <li>▶ Preise identisch für alle Szenarien</li> <li>▶ 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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 0 % Überbauung und damit ein schnellerer notwendiger Markthochlauf.</li> <li>▶ PtG/L-Importe werden bereits in 2030 zu 1/3 und in 2040 der Importüberschuss im nationalen Verkehr eingesetzt.</li> </ul>
Technologieausrichtung Wind und PV	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Wind: Basisannahmen Auswahl zwischen Schwachwind-Anlagen und Starkwindszenarien (Schwachwindanlagen mit geringer Leistung pro Anlage)</li> <li>▶ PV: Langfristig 50 %/50 % Dach- zu Freifläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Wind: wie in GreenEe</li> <li>▶ PV: Langfristig 75 %/25 % Dach- zu Freifläche → geringerer Rohstoffverbrauch und etwas teurer</li> </ul>

Quelle: eigene Zusammenstellung

#### 4.8.2 Technologieannahmen für Photovoltaik- und Windenergieanlagen

Die Technologieannahmen für Photovoltaik- und Windenergieanlagen entsprechen denen, die in GreenMe getroffen wurden (Dittrich et al. 2020c). Die Annahmen für PV sind:

- ▶ Für die Modellierung der Energieerzeugung aus Photovoltaik (PV) werden verschiedene Technologien auf Dachflächen und Freiflächen unterschieden. Das Verhältnis zwischen PV-Frei- und Dachflächen liegt bei 25 % Freiflächenanlagen und 75 % Dachflächenanlagen.

<sup>4</sup> Überbauung ist die Erhöhung der jährlichen Installationsrate im Zeitraum zwischen heute und 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, ...).

Durch diese Verschiebung werden PV-Anlagen etwas teurer, womit sich das Verhältnis zwischen Wind- und PV-Anlagen zugunsten von (rohstoffeffizienteren) WEA verschiebt.

- ▶ Für Dachflächen ab 2030 werden amorphe Silizium-Dünnschicht PV Zellen in der Rohstoffrechnung angenommen. Der Zubau erfolgt zu 50 % ab 2025 und flächendeckend ab 2030. Der Wirkungsgrad der Dünnschicht-PV steigert sich schrittweise mit 10 % Wirkungsgrad in 2010, 15 % ab 2025 und 19,55 % ab 2030 (entspricht dem Wirkungsgrad der Dickschicht-PV).
- ▶ Für Freiflächen ab 2030 werden bifaziale Dickschichtzellen angenommen. Der Wirkungsgrad der bifazialen PV wird mit 23,1 % angenommen. Der Zubau erfolgt wie bei den Dachflächen-PV-Anlagen ab 2025 zu 50 % und ab 2030 zu 100 % mit der neuen Technologie.
- ▶ Die Lebensdauer von 25 Jahren ist für alle PV-Technologien gleich angenommen.
- ▶ Die Aufständigung für Dach- und Freiflächen sowie die Wechselrichter werden mit einer Lebensdauer von 50 Jahren angenommen.

Die Annahmen für WEA sind:

- ▶ Für den Bereich Windenergie onshore werden Schwachwind-WEA angenommen, welche eine Leistung von 6 MW bei einer Nabenhöhe 149 m und einem Rotordurchmesser 120 m aufweisen. Ab 2025 werden diese Anlagen zu 50 % und ab 2030 flächendeckend gebaut.
- ▶ Ferner wird die Lebensdauer für die Anlagentechnik bei Windenergie onshore mit 20 Jahren für bewegliche Teile und 40 Jahre für fest installierte Anlagenteile wie Gründung und Turmkonstruktion angenommen. Es wird ferner angenommen, dass Hybridtürme gebaut werden, die im unteren Teil aus Stahlbeton und im oberen aus Stahlrohr bestehen.
- ▶ Für den Bereich Windenergie offshore werden für den Zeitraum bis 2050 Anlagen mit zunehmenden Dimensionen und Leistungen im Vergleich zur Gegenwart angenommen. Es wird angenommen, dass ab 2025 die Hälfte aller WEA-Anlagen und ab 2030 ausschließlich 12 MW-Anlagen gebaut werden. Diese haben eine Nabenhöhe von 120 m und einen Rotordurchmesser von 200 m. Die Lebensdauer für die Anlagentechnik bei Windenergie offshore ist mit 20 Jahren für bewegliche Teile angenommen, fest installierte Anlagenteile wie Gründung und Turmkonstruktion werden mit einer längeren Lebensdauer von 40 Jahren angenommen.

#### **4.8.3 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 Wind-Onshore und Photovoltaik vorgegeben. Der Markthochlauf für PV weist wie in den GreenEe-Szenarien aufgrund der Langlebigkeit der Module ohne eine Überbauung (maximaler jährlicher Absatzmarkt vor 2050 gegenüber der langfristigen Repoweringrate nach 2050) geringere Freiheitsgrade als Onshore auf. Die Ausprägung in 2030 und 2040 im Ausbaukorridor wird dabei durch das THG-Emissionsziel bestimmt. Da dieses Ziel aber sehr hoch ist, liegt das Ergebnis des Ausbaus der erneuerbaren Energien an der Obergrenze.

#### 4.8.4 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. Um aber eine maximale THG-Emissionsminderung zu erreichen, wird ein Markthochlauf ohne eine zeitweise Überbauung der jährlichen Import-Infrastruktur abgebildet (maximaler jährlicher Absatzmarkt vor 2050 gegenüber der langfristigen Repoweringrate nach 2050). Ob dieser daraus resultierende deutlich schneller Markthochlauf gegenüber den anderen Green-Szenarien politisch realisierbar ist, wird dabei nicht bewertet.

Die Importe in 2030 und 2040 werden im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien auch dem nationalen THG-Emissionsziel angerechnet, da im Jahr 2040 die Importmenge den Bedarf im internationalen Verkehr und im nichtenergetischen Verbrauch bereits übertrifft. Entsprechend werden hier die überschüssigen Importmengen für den nationalen Verkehr verwendet. Im Jahr 2030 wird eine pauschale 1/3-Aufteilung auf internationalen Verkehr, Rohstoffe und nationalen Verkehr unterstellt, um auch einen Markthochlauf im Absatzmarkt zu gewährleisten. Entsprechend kann in GreenSupreme als einzigem Szenario auch in 2030 und 2040 das nationale Emissionsziel durch PtG/L-Importe reduziert werden.

#### 4.8.5 Herkömmlicher Stromverbrauch

Die Entwicklung des klassischen Stromverbrauchs ohne neue Sektorkopplungs-Anwendungen ist in Tabelle 26 für GreenSupreme absolut und relativ im Vergleich zu GreenEe2 dargestellt. Für die produktionsrelevanten Bereiche erfolgt eine proportionale Änderung des Strombedarfes in allen Stützjahren entsprechend dem Verhältnis der Gesamtproduktionsmengen in GreenSupreme zum GreenEe1. Für die Anwendungen, welche in Wechselwirkung mit der Gebäudefläche stehen, erfolgt eine proportionale Änderung des Stromverbrauchs in allen Stützjahren entsprechend dem Verhältnis der Gebäudefläche in GreenLife zum GreenEe1. Für alle weiteren Verbraucher werden die identischen Werte aus GreenEe1 unterstellt.

**Tabelle 26: Klassischer Stromverbrauch GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

TWh/a		2030	2040	2050	2030 relativ zu GreenEe2	2040 relativ zu GreenEe2	2050 relativ zu GreenEe2
Indus- trie	Prozesswärme-monovalent	67,7	72,8	78,5	105,9 %	109,4 %	93,8 %
	Klimakälte	3,2	2,1	0,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	3,1	1,9	0,9	94,6 %	90,9 %	90,5 %
	Mechanische Energie	68,8	54,8	44,3	98,8 %	96,0 %	94,8 %
	IKT	8,8	8,0	7,7	94,6 %	90,9 %	90,5 %
	Beleuchtung	8,6	7,0	5,4	100,0 %	100,0 %	100,0 %
GHD	Prozesswärme-monovalent	7,8	7,2	6,9	94,5 %	90,9 %	91,1 %
	Klimakälte	5,3	7,7	10,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	13,5	14,1	15,1	94,7 %	91,1 %	91,1 %
	Mechanische Energie	28,1	20,1	13,7	95,1 %	92,7 %	94,6 %
	IKT	22,0	19,6	18,3	94,7 %	91,1 %	91,1 %

TWh/a		2030	2040	2050	2030 relativ zu GreenEe2	2040 relativ zu GreenEe2	2050 relativ zu GreenEe2
Haus-halte	Beleuchtung	41,4	29,9	18,3	100 %	100 %	100 %
	Mechanische Energie	4,2	3,6	3,0	95,8 %	89,8 %	83,5 %
	Beleuchtung	7,6	4,4	1,5	95,8 %	89,8 %	83,5 %
	PW, Kälte, IKT	81,7	72,6	63,5	100 %	100 %	100 %
Gebäudewärme NSH/TWW		13,7	6,7	3,6	99,6 %	99,0 %	98,7 %
Verkehr - Schiene		14,6	15,9	17,3	104,4 %	108,7 %	113,8 %
Umwandlungsverbrauch		7,0	4,0	3,0	100 %	100 %	100 %
Leitungsverluste		26,9	29,5	32,0	96,4 %	96,2 %	97 %

Quelle: ifeu/IEE/SSG – eigene Berechnungen

#### 4.8.6 Biomassenutzung

Die detaillierte Herleitung der Szenarioannahmen der Biomassenutzung sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020a) 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 GreenSupreme sind in 2050 die errechneten Mengen aus Gülle und Mist, die anfallen und in die Vergärung gehen, um 14 % geringer wie in GreenEe2. Im Vergleich zu GreenLife wird der Zielpunkt 2050 schon 10 Jahre früher im Jahr 2040 erreicht.

**Tabelle 27: Stromerzeugung in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

TWh		Strom aus Biogas	davon Strom aus Gülle	davon Strom aus NaWaRo	davon Strom aus Klärgas	davon Strom aus Abfall
2030	GreenEe2	10,01	6,11	2,70	0,76	0,44
	GreenSupreme	8,27	4,37	2,70	0,76	0,44
2040	GreenEe2	8,03	6,90	0,00	0,80	0,33
	GreenSupreme	5,44	4,31	0,00	0,80	0,33
2050	GreenEe2	6,53	5,25	0,00	0,90	0,38
	GreenSupreme	5,59	4,31	0,00	0,90	0,38

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

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

**Tabelle 28: Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien**

TWh		Summe Biomethan	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

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 Altholzpoteztiale in der Industrie eingesetzt, dadurch können dort 34 TWh Wärme auf einem Temperaturniveau bis 500°C bereitgestellt werden,

**Tabelle 29: Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industrielle Reststoffen) in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

TWh		Strom aus Biogas	Wärme in Industrie	Wärme in HH und GHD	Biomethan	BtL	BTL-Verwendung	
							Verkehr	ch. Industrie
2030	GreenEe2	10,01	49,69	9,89	6,95	15,90	15,90	
	GreenSupreme	8,27	50,29	9,31				
2040	GreenEe2	8,03	45,86	0,84	5,36	16,80	8,40	8,40
	GreenSupreme	5,44	46,00	0,70				
2050	GreenEe2	6,53	33,80	0,00	5,94	17,68		17,68
	GreenSupreme	5,59						

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

#### 4.8.7 Sonstige Rest- und Abfallströme

Das Müllaufkommen und damit die Strom- und Wärmeerzeugung wurde mit Hilfe eines Korrekturfaktors zur Produktionseffizienz wie in GreenMe (Steigerung bis 1,04 in 2050) gegenüber GreenEe abgeleitet. Des Weiteren wird ein Faktor zur Reduktion des Müllaufkommens durch Verbraucherverhalten wie in GreenLife (Steigerung bis 1,2 in 2050) unterstellt. Die Szenarioannahmen sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020a) dargestellt. In Summe ergibt sich eine geringere Strom- und Wärmeerzeugung, aber auch etwas geringere THG-Emissionen. Die THG-Emissionen in 2050 sind per Definition durch die unterstellte vollständige Versorgung des nichtenergetischen Verbrauchs mit treibhausgasneutralem PtG/PtL einheitlich auf „Null“ gesetzt.

**Tabelle 30: Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenSupreme im Vergleich mit den GreenEe-Szenarien**

	2030		2040		2050	
	GreenEe1/2	GreenSupreme	GreenEe1/2	GreenSupreme	GreenEe1/2	GreenSupreme
Stromerzeugung (netto) [TWh <sub>el</sub> ]	5,30	4,67	4,40	3,63	3,60	2,77
Wärmeerzeugung (Fernwärme) [TWh <sub>th</sub> ]	5,83	5,14	5,00	4,12	4,17	3,20
Emissionen [Mio. t CO <sub>2</sub> Äq]	17,4	15,35	13,6	11,21	0	0

Quelle: eigene Annahmen UBA, ifeu, IEE

## 5 Ergebnisse

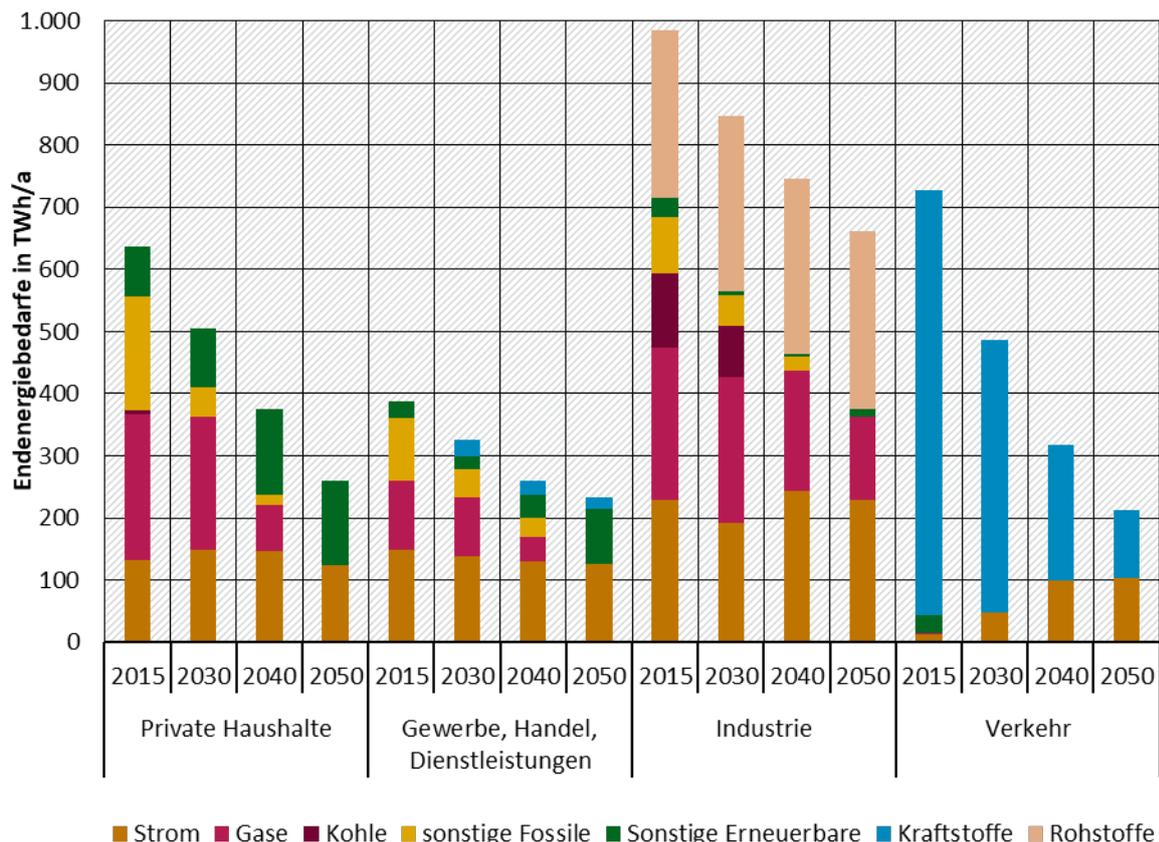
### 5.1 Energie

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse der Gesamtsystemoptimierung mittels SCOPE und des Verkehrsbereichs mittels TREMOD dargestellt. Auch wenn GreenSupreme nicht direkt mit einem anderen der Green-Szenarien verglichen werden kann um die Wirkung eines einzelnen Parameters zu analysieren wird im Folgenden der Fokus auf den Vergleich mit GreenEe2 gelegt, um den Einfluss von Materialeffizienz und Technikinnovation sowie Lebenswandel bewerten zu können. Dabei ist aber die Reduktion der Produktionsmengen „Nullwachstum“ in GreenSupreme gegenüber „ausgeglichene Handelsbilanz“ in GreenEe2 nicht gleichzusetzen, aber im Hinblick auf die Exportüberschüsse in GreenEe1 der geeignetere Vergleich.

#### 5.1.1 Endenergiebedarfe

Die Entwicklung der Endenergieverbräuche ist differenziert nach Energieträgern und Sektoren in Abbildung 1 dargestellt.

**Abbildung 1: Entwicklung der Endenergiebedarfe**



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

GreenSupreme weist in allen Stützjahren den geringsten Energiebedarf insgesamt auf und halbiert sich auf 1366 TWh in 2050. Auch in den einzelnen Sektoren verzeichnet dieses Szenario den geringsten Endenergiebedarf. Im Bereich Verkehr erfolgt die größte sektorale Reduktion des Energiebedarfs, dieser sinkt von 2015 um 71 % bis 2050 auf 212 TWh. Im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien wird dabei die Energieeinsparung durch den Lebensstilwandel,

Materialeffizienz + Technikinnovation und das Nullwachstum deutlich. Im Vergleich zu GreenEe2 ist der Endenergiebedarf 2050 um 11 % geringer. Im Nicht-Strom-Bereich der synthetischen Gase (PtG), sonstige Erneuerbare und Kraftstoffe (PtL) fällt die Reduktion mit -14 % gegenüber GreenEe2 noch stärker aus, wie Tabelle 31 zeigt.

**Tabelle 31: Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

TWh/a		Strom	Gase	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
	<b>Summe</b>	<b>521</b>	<b>594</b>	<b>126</b>	<b>374</b>	<b>170</b>	<b>683</b>	<b>269</b>	<b>2.737</b>
2030 GreenSupreme	HH	148	214	0	48	96	0	0	506
	GHD	137	95	0	46	21	27	0	326
	Industrie	191	235	84	50	5	0	282	846
	Verkehr	48	0	0	0	0	437	0	485
	<b>Summe</b>	<b>524</b>	<b>545</b>	<b>84</b>	<b>143</b>	<b>122</b>	<b>465</b>	<b>282</b>	<b>2.163</b>
GreenEe2	<b>Summe</b>	<b>484</b>	<b>560</b>	<b>128</b>	<b>156</b>	<b>111</b>	<b>523</b>	<b>282</b>	<b>2.244</b>
2040 GreenSupreme	HH	147	73	0	17	137	0	0	374
	GHD	130	40	0	30	38	23	0	261
	Industrie	243	193	0	24	4	0	282	746
	Verkehr	99	0	0	0	0	218	0	317
	<b>Summe</b>	<b>620</b>	<b>306</b>	<b>0</b>	<b>70</b>	<b>179</b>	<b>241</b>	<b>282</b>	<b>1.697</b>
GreenEe2	<b>Summe</b>	<b>581</b>	<b>327</b>	<b>55</b>	<b>79</b>	<b>183</b>	<b>327</b>	<b>282</b>	<b>1.834</b>
2050 GreenSupreme	HH	123	0	0	0	138	0	0	261
	GHD	126	0	0	0	88	19	0	232
	Industrie	228	136	0	0	11	0	286	661
	Verkehr	104	0	0	0	0	108	0	212
	<b>Summe</b>	<b>580</b>	<b>136</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>236</b>	<b>127</b>	<b>286</b>	<b>1.366</b>
GreenEe2	<b>Summe</b>	<b>627</b>	<b>146</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>279</b>	<b>200</b>	<b>288</b>	<b>1.540</b>

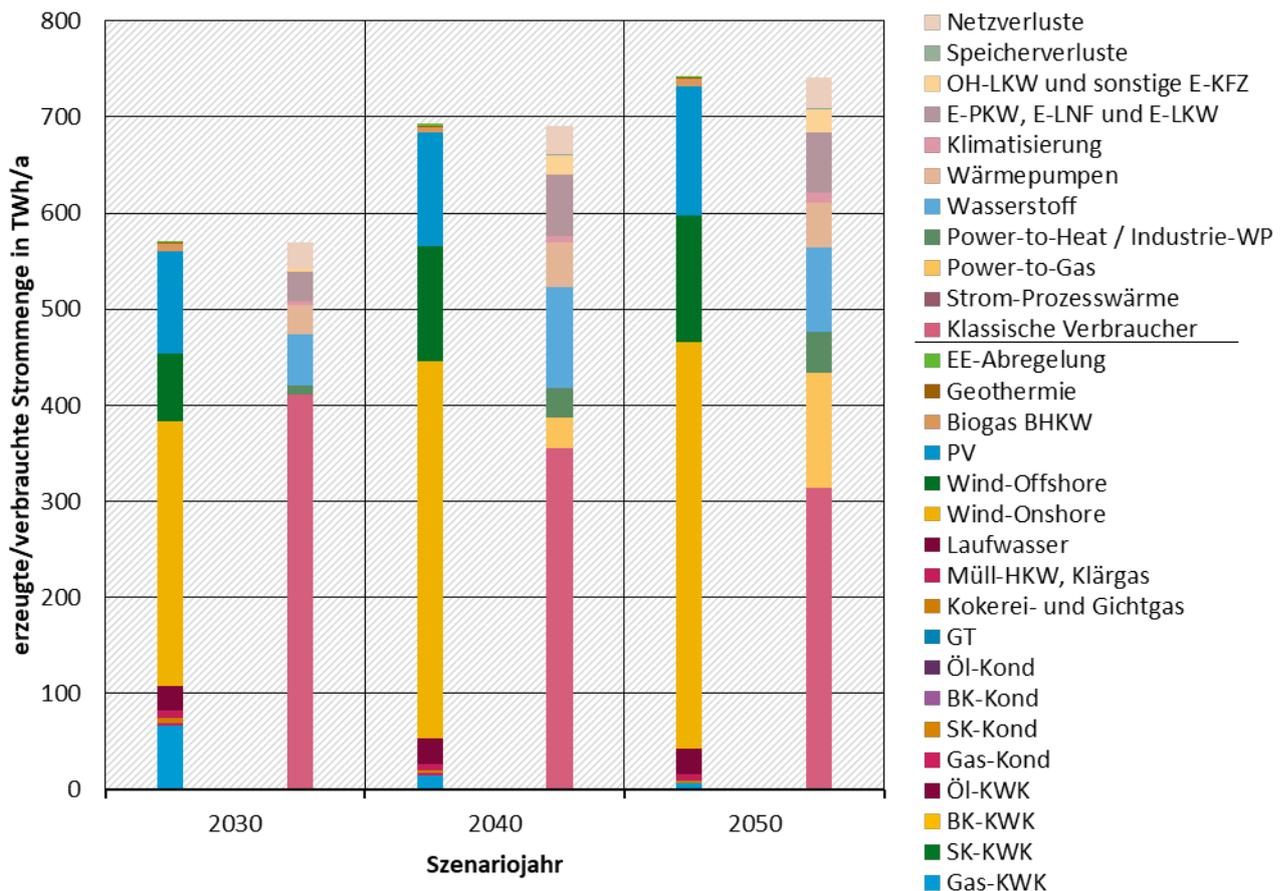
Quelle: ifeu/IEE/SSG – GEMOD, TREMOD, SCOPE, URMOD

## 5.1.2 Stromsektor

### 5.1.2.1 Strombilanz in Deutschland

In Abbildung 2 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 2: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland**



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

In der Bilanz des dämpfenden Einflusses von gesteigerter Energieeffizienz und gerändertem Konsumverhalten einerseits mit dem verbrauchssteigernden Einfluss der zunehmenden Sektorkopplung andererseits steigt der Stromverbrauch in Summe auf 741 TWh. Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien ergibt sich so der geringste Bedarf. So werden beispielsweise 51 TWh weniger als in GreenLate und 47 TWh weniger als in GreenEe2 benötigt. Die herkömmlichen, also heutigen, Stromverbraucher, sinken vor dem Hintergrund der Effizienzsteigerung deutlich auf nur noch 314 TWh (30 % weniger als in GreenLate und 6 % weniger als in GreenEe2). Der mittelfristig hohe Stromverbrauch ist insbesondere auf den früheren Wasserstoffstrombedarf der Industrie zurückzuführen. Bereits 2030 werden hierfür 52 TWh und 2040 rund 105 TWh Strom benötigt. Der Stromverbrauch von Elektromobilität und Wärmepumpen ist dagegen mittelfristig nur moderat höher als in den anderen Green-Szenarien, da die höhere Durchdringung der Technologie hier noch die Verbrauchseinsparung überwiegt. Durch den schnelleren erforderlichen Ausbau der erneuerbaren Energien ist zudem in 2040

mehr „überschüssiger Strom“ für PtH-Anwendungen verfügbar, und 2040 kann auch schon in Deutschland PtG hergestellt werden.

Die durch den Kohleausstieg 2030 wegfallende Stromerzeugung führt zu einer moderaten Mehrerzeugung von Gaskraftwerken. Vor allem wird dies durch deutlich mehr Wind- und PV-Stromerzeugung kompensiert und auch noch der Mehrstromverbrauch in 2030 gedeckt. Charakteristisch leisten Photovoltaik und Windenergie onshore mit 557 TWh etwa 75 % den größten Beitrag zur Nettostromversorgung in 2050.

**Tabelle 32: Nettostromerzeugung in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

TWh/a		Wasser	Bio	Geothermie	Müll, Klärg.	Gas	Braunkohle	Steinkohle	On-shore	Off-shore	PV	SUMME	EE-Abregel
2030	Green Supr.	25,9	8,3	0,6	7,7	74,7	0,0	0,0	274,6	71,3	105,7	<b>568,8</b>	1,2
	Green-Ee2	25,9	10,0	0,6	8,3	59,9	30,0	43,9	192,8	71,3	89,7	<b>532,4</b>	0,2
2040	Green Supr.	26,5	5,4	0,9	6,8	20,1	0,0	0,0	392,5	119,8	118,3	<b>690,3</b>	3,1
	Green-Ee2	26,5	8,0	0,9	7,5	53,3	0,0	0,0	300,3	103,8	119,8	<b>620,1</b>	0,0
2050	Green Supr.	26,9	7,8	1,3	6,1	9,4	0,0	0,0	423,1	132,1	134,0	<b>740,7</b>	2,2
	Green-Ee2	26,9	6,5	1,4	6,9	10,8	0,0	0,0	418,9	139,7	176,3	<b>787,5</b>	4,2

Quelle: ifeu/IEE/SSG – SCOPE

**Tabelle 33: Nettostromverbrauch zuzüglich Verluste in GreenSupreme im Vergleich zur GreenEe2**

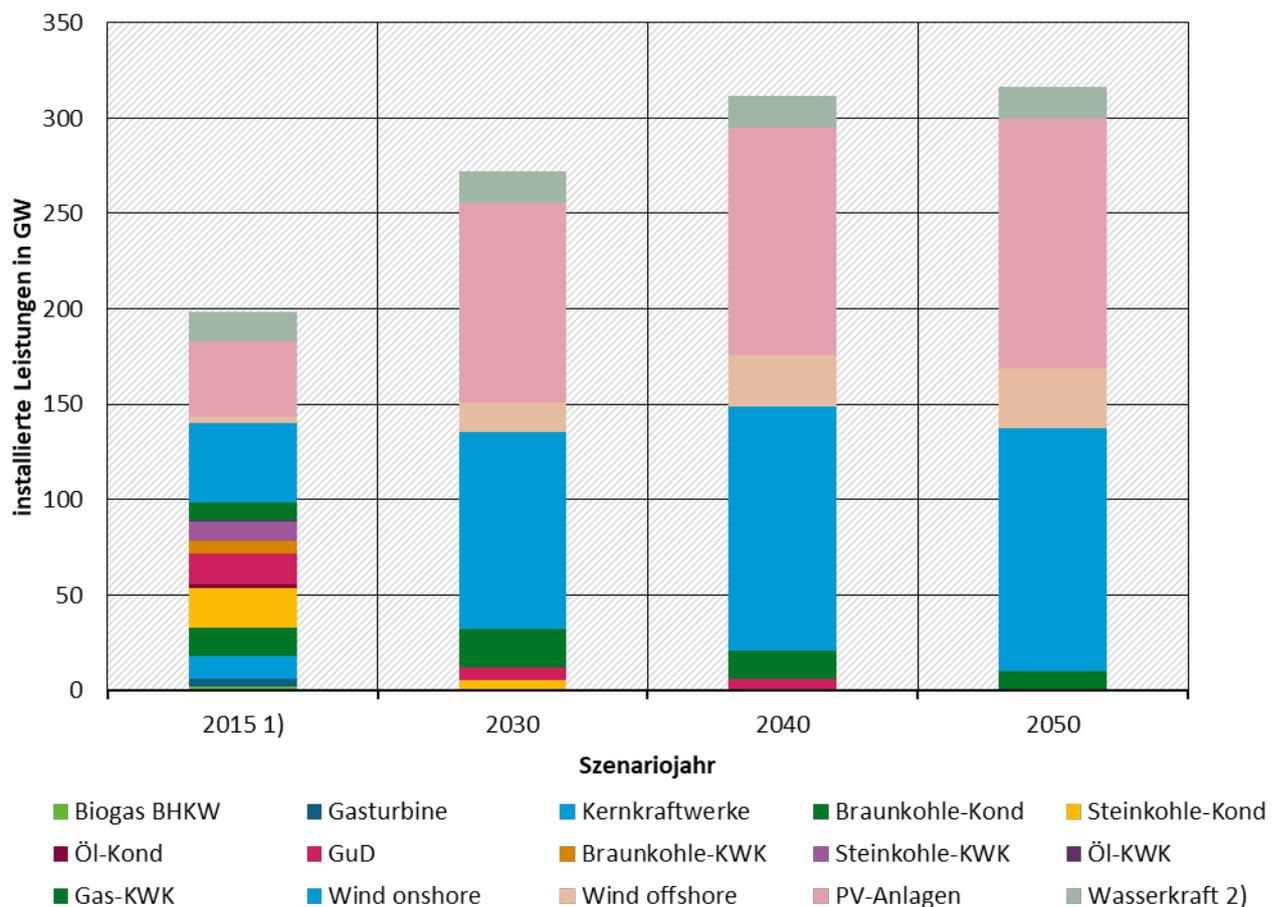
TWh/a		herk. Verbrauch	PtG	PtH	H2	WP	Klima	E-Mob	OH-Lkw u.a.	Speicherverlust	Netzvverlust
2030	GreenSupr.	410,6	0,0	10,5	52,0	30,8	4,8	29,6	4,3	0,7	26,9
	Green-Ee2	412,6	0,0	11,4	22,6	26,0	4,9	21,7	5,1	0,2	28,0
2040	GreenSupr.	355,4	31,9	30,3	105,1	46,6	7,1	63,6	19,7	1,1	29,5
	Green-Ee2	361,5	0,0	18,5	78,6	44,4	7,3	56,8	20,3	2,0	30,7
2050	GreenSupr.	313,9	120,0	42,1	87,5	47,8	9,6	62,6	23,6	1,5	32,0
	Green-Ee2	332,8	123,8	35,1	95,3	55,5	9,7	71,5	28,9	1,7	33,0

Quelle: eigene Analysen ifeu/IEE/SSG – SCOPE

### 5.1.2.2 Installierte Leistungen in Deutschland

In Abbildung 3 ist die für die Deckung des nationalen Stromverbrauchs notwendige installierte Leistung an Stromerzeugern dargestellt.

**Abbildung 3: Installierte Leistungen Deutschland**



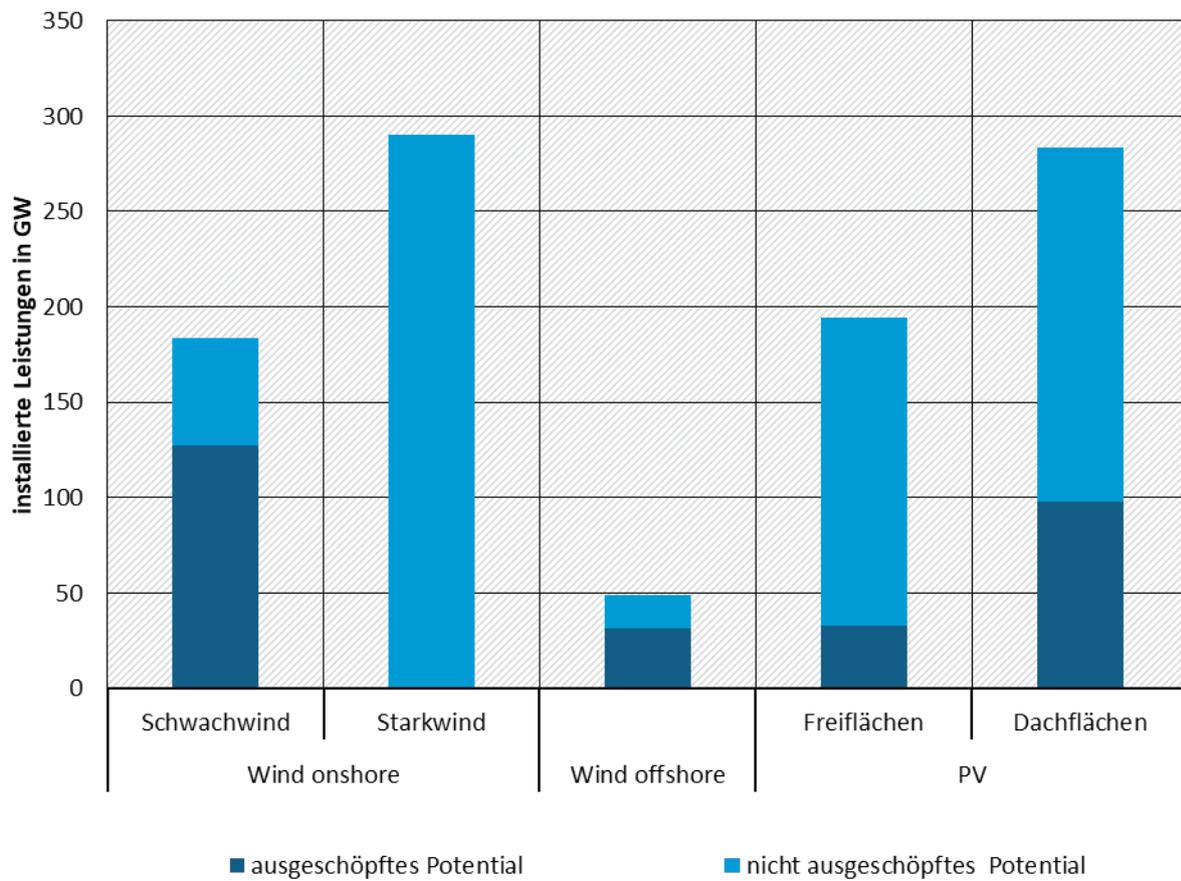
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – SCOPE

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

Dabei stellt der Zubau von Wind und PV das Ergebnis einer anteiligen Flächenpotenzialausschöpfung dar, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. In GreenSupreme wird das vorab festgelegte Potential für erneuerbare Energien im Vergleich der Green-Szenarien am geringsten genutzt. Insbesondere das mögliche Potential von Photovoltaik wird nur wenig ausgeschöpft. Das Verhältnis der Dach- zu Freiflächen-PV-Anlagen ist dabei exogen vorgeben und stellt kein Ergebnis der Modellierung dar. Wie auch in den anderen Green-Szenarien werden 2050 ausschließlich Schwachwind Anlagen installiert und dabei etwa 70 % des vorab festgelegten Potentials ausgenutzt. Für Wind-Offshore wird die vorgegebene Mindestleistung von rund 32 GW ausgebaut.

**Abbildung 4: Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050**



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

Für die Ausbaupfade werden wie in Kapitel 4.8.3 beschrieben Ausbaukorridore ausgehend vom Zielwert 2050 vorgegeben. Der mit Hilfe des Modells ermittelte Markthochlauf für Wind-Onshore und PV befindet sich in 2030 und 2040 an der Obergrenze, da das THG-Emissionsziel so streng festgelegt wurde, dass ein Ausbau auf dieses Niveau notwendig wird, um es durch die Optimierung noch erreichen zu können. Bemerkenswert ist dabei, dass das langfristige Ziel für Onshore-Wind bereits sehr früh im Jahre 2040 erreicht wird, wodurch ein hoher frühzeitiger Beitrag zur Stromerzeugung erreicht wird. Während die langfristigen Zielwerte aufgrund des geringen Stromverbrauchs gering sind, ist insbesondere das Ziel für 2030 energiepolitisch aus heutiger Sicht sehr ambitioniert.

**Tabelle 34: Markthochlauf Wind-Onshore und PV**

GW	Wind Onshore			PV		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Obergrenze	103,3	127,5		104,6	91,5	
Untergrenze	60,1	91,9		77,1	119,1	
Investition	103,3	127,5	127,4	104,6	119,1	130,5

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Die installierten Leistungen sind in Tabelle 35 zu sehen. Neben den bereits diskutierten Effekten bei Wind-Onshore und PV wird der Kohleausstieg bis 2030 deutlich. Steinkohlekraftwerke werden zur Versorgungssicherheit 2030 noch nicht vollständig verdrängt, kommen jedoch nicht zum Einsatz. Gaskraftwerke müssen 2030 zugebaut werden, wobei es 2040 und 2050 schon wieder weniger benötigt werden. Gas nimmt also noch viel stärker die Rolle einer Brückentechnologie ein als in den anderen Green-Szenarien. Dabei wurde aber nur bewertet, welche Leistung in dem gewählten Wetterjahr abgerufen wurde und nicht welche zusätzliche Leistung zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit bei Extremereignissen benötigt wird. Im Vergleich zu GreenEe2 wird deutlich, dass durch den höheren PV-Dachflächenanteil aus Sicht der Materialeffizienz und des geringeren Stromverbrauchs in Summe (Nullwachstum, Lebensstieländerung, Effizienz) die installierte PV-Leistung um 38 GW niedriger ausfällt. Teilweise kompensiert wurde dieser Effekt durch die nationale PtG-Leistung, welche mit 3 GW höher ausfällt als in GreenEe2.

**Tabelle 35: Installierte Leistungen in GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

GW	Bio	Gas	Kernkraft	Braunkohle	Steinkohle	Öl	Onshore	Offshore	PV	PtG	Batt Speicher	Wasser	
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	Green-Supr.	0,1	27,4	0,0	0,0	4,5	0,2	103,3	15,6	104,6	0,0	0,0	16,7
	Green-Ee2	0,1	24,3	0,0	5,2	11,3	0,2	82,0	15,6	87,7	0,0	0,0	16,7
2040	Green-Supr.	0,1	20,9	0,0	0,0	0,0	0,1	127,5	27,4	119,1	13,2	0,0	16,7
	Green-Ee2	0,1	25,8	0,0	0,0	0,0	0,1	100,6	23,8	117,5	0,0	0,0	16,7
2050	Green-Supr.	0,1	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	127,4	31,7	130,5	33,3	0,0	16,8
	Green-Ee2	0,1	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	127,4	32,7	168,9	30,4	0,0	16,8

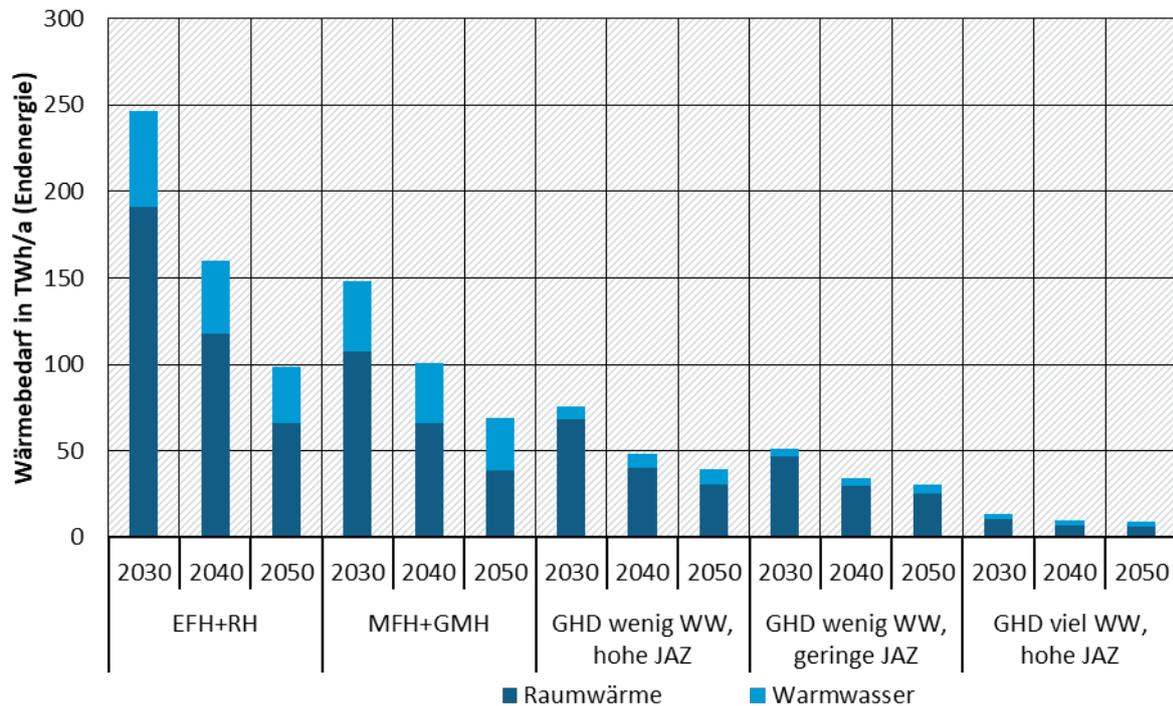
Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

### 5.1.3 Wärmesektor

#### 5.1.3.1 Gebäudewärme Haushalte und GHD

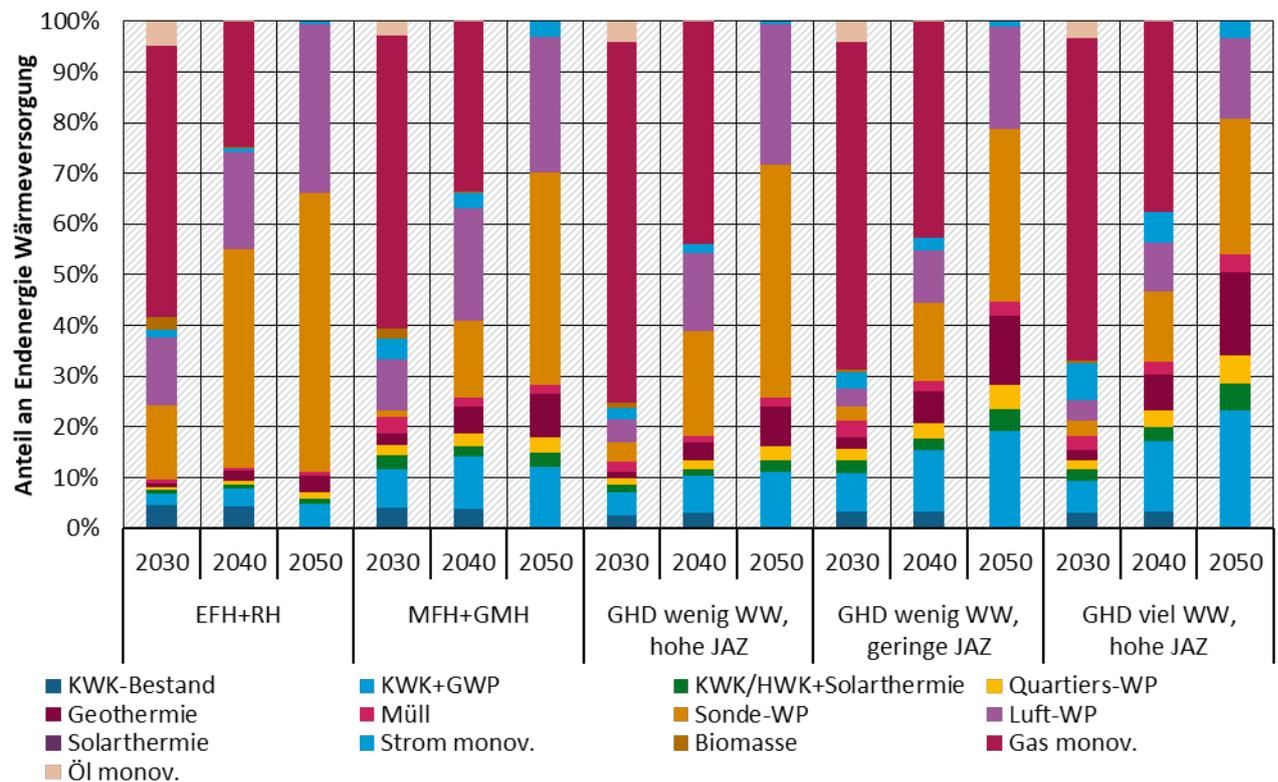
Auf Basis der Zwischenergebnisse zu der Gebäudewärmebedarfsentwicklung und den EE-Wärmepotenzialen in Kapitel 0 werden im Folgenden die Ergebnisse der Gesamtsystem-Optimierungsrechnung und damit die Rückkopplung der THG-Emissions-Ziele auf die Investitionsentscheidungen in der Wärmeversorgung dargestellt. Die Entwicklung der Gebäudewärmebedarfe (Raumwärme und Trinkwarmwasser) für Haushalte (Wohngebäude) und GHD (Teil der Nichtwohngebäude ohne Industriegebäude) ist noch einmal in Abbildung 5 zusammengefasst. Das Ergebnis der Optimierungsrechnung ist in Abbildung 6 dargestellt.

**Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Raum- und Trinkwarmwasserwärme in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden (GHD) – GreenSupreme sowie GreenLife**



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

**Abbildung 6: Deckung der Wärmenachfrage**



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse 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 (2,4 %). Ohne diese Rückkopplung, würde die Technikkombination nicht zur Deckung der Wärmeversorgung genutzt. Der größte Anteil zur netzgebundenen Wärmeversorgung wird durch moderne KWK-Systeme mit Großwärmepumpen (9,7 %) bereitgestellt.

**Tabelle 36: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung GreenSupreme im Vergleich zu GreenEe2**

	Festlegungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenSupreme		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
KWK-Bestand	Aus Kraftwerksliste	6,2 %	3,4 %	0,0 %	4,3 %	3,9 %	0,0 %
KWK+GWP	Obergrenze (Potential)	3,6 %	6,4 %	8,4 %	4,8 %	7,1 %	9,7 %
KWK/HWK + Solarthermie - saisonal + PtH	Frei	1,0 %	3,0 %	1,8 %	1,7 %	1,4 %	2,2 %
Quartiers-WP	Festsetzung (ohne Kostenannahmen)	0,9 %	1,6 %	2,1 %	1,3 %	1,8 %	2,4 %
Geothermie + Solarthermie-ganzjährig	Obergrenze (Potenzial)	1,3 %	3,0 %	5,8 %	1,5 %	3,6 %	6,9 %
Müll + Biomasse	Festsetzung (ohne Kostenannahmen)	2,0 %	1,1 %	1,2 %	2,0 %	1,3 %	1,4 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

In der dezentralen Wärmeversorgung wird das langfristige Potenzial für Erdsonden in 2050 ausgeschöpft und ein sehr effizientes System erreicht. Sie leisten bis 2050 den größten Anteil (46,3 %) zur dezentralen Wärmeversorgung. Im Vergleich mit GreenMe (beide Szenarien schöpfen das Erdsonden-Potenzial aus) ist der relative Anteil aber geringer, da es mehr Mehrfamilienhäuser gibt und das Potenzial dadurch beschränkt wird. In GreenEe2 wird dagegen bei einem gleichen relativen Anteil das Erdsondenpotenzial nicht vollständig ausgeschöpft. Konventionelle Heiztechniken werden entsprechend der Annahmen (siehe Kapitel 4.5.4) bis 2050 vollständig verdrängt. Langfristig verbleiben noch 1,4 % Durchlauferhitzer. Das Ergebnis ist mit den anderen Green-Szenarien außer GreenLate vergleichbar.

**Tabelle 37: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung**

	Festlegungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenSupreme		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Sonde-WP	Obergrenze aus GEMOD	7,3 %	28,6 %	46,3 %	7,9 %	28,6 %	46,3 %
Luft-WP	Frei	6,2 %	12,8 %	28,3 %	10,0 %	18,4 %	28,3 %
Solarthermie	Aus GEMOD	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %

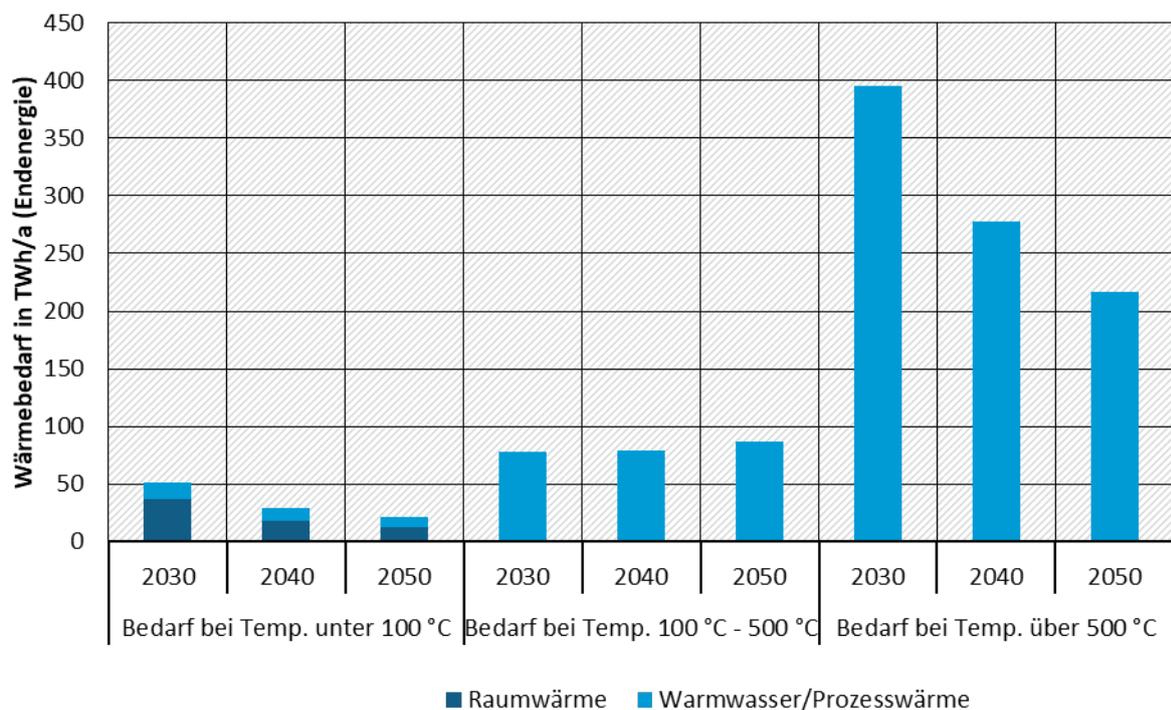
	Festlegungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenSupreme		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Strom monov.	Aus GEMOD	2,6 %	1,9 %	1,4 %	2,6 %	1,9 %	1,4 %
Biomasse	Aus GEMOD	2,0 %	0,2 %	0,0 %	2,0 %	0,2 %	0,0 %
Gas monov.	Untergrenze aus GEMOD	62,5 %	37,6 %	0,0 %	58,5 %	32,0 %	0,0 %
Öl monov.	Aus GEMOD	4,0 %	0,0 %	0,0 %	4,1 %	0,0 %	0,0 %

Quelle: eigene Berechnungen 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 stark zurück (siehe Abbildung 7) und aufgrund des unterstellten langfristigen „Null-Wachstums“ ist die Industrieprozesswärmefachfrage die geringste von allen Green-Szenarien.

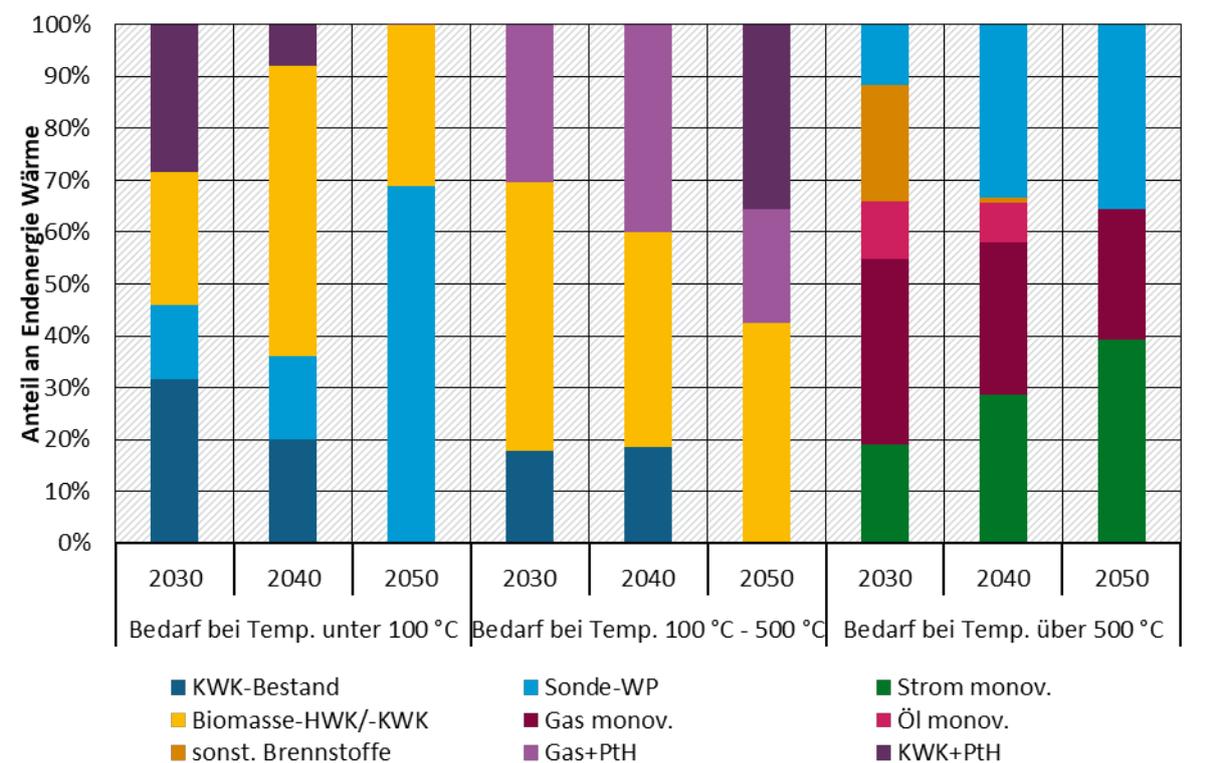
**Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD-Prozesswärme – GreenSupreme**



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

Dabei wird diese Nachfrage wie in Abbildung 8 dargestellt je nach Temperaturniveau unterschiedlich versorgt. So werden für Bedarfe < 100°C ausschließlich Wärmepumpen (mit Abwärmenutzung hier vereinfacht als Sonden-Wärmepumpen 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. 2020a) eingesetzt. Neben diesen optimierten Ergebnissen sind zusätzlich die exogenen **Vorgaben** für Verfahren >500°C im zeitlichen Verlauf dargestellt.

**Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme**



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

### 5.1.4 Verkehrssektor

Im Folgenden ist der resultierende Endenergieverbrauch im Verkehrssektor differenziert nach Verkehrsmitteln von GreenSupreme dargestellt. GreenSupreme hat gemeinsam mit GreenLife die ambitioniertesten Annahmen zur Verkehrsvermeidung und Verlagerung, gleichzeitig die ambitioniertesten Annahmen zu Elektromobilität und Effizienzverbesserungen in den Fahrzeugflotten. Dementsprechend besteht in GreenSupreme im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien der geringste Endenergiebedarf. Der nationale Verkehr benötigt 10 bzw. 25 % (2030 bzw. 2050) weniger Endenergie, der internationale Verkehr 11 % bzw. 43 % als in GreenEe2.

**Tabelle 38: EEV nach Verkehrsmitteln**

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	Green-Supreme	GreenEe2	Green-Supreme	GreenEe2	Green-Supreme
MIV	384	255	223	164	118	99	67
ÖSPV	16	15	16	13	15	11	13
ÖV Schiene	10	10	10	10	10	10	10
Güter Straße	193	134	121	96	82	74	57
Güter Schiene	5	5	5	6	5	6	5

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	Green-Supreme	GreenEe2	Green-Supreme	GreenEe2	Green-Supreme
Güter Binnenschiff	4	3	3	3	3	3	3
Flug national	10	4	6	6	3	4	0
Flug internat.	87	105	95	91	70	77	42
Seeverkehr intern.	27	20	16	17	13	15	10
<b>Gesamt national</b>	<b>621</b>	<b>430</b>	<b>385</b>	<b>297</b>	<b>237</b>	<b>207</b>	<b>156</b>
<b>International</b>	<b>114</b>	<b>125</b>	<b>111</b>	<b>108</b>	<b>83</b>	<b>92</b>	<b>52</b>
<b>Gesamt</b>	<b>735</b>	<b>554</b>	<b>496</b>	<b>405</b>	<b>320</b>	<b>299</b>	<b>208</b>

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - TREMOD

Alternativ ist in Tabelle 39 der Endenergiebedarf nach Energieträger aufgeschlüsselt dargestellt. In den Jahren 2030 und 2040 ist der Stromverbrauch in GreenSupreme auch in absoluten Zahlen höher als in den anderen Green-Szenarien aufgrund der starken Elektrifizierung (Ausnahme GreenLife). 2050 überwiegt dagegen der Effekt der Verkehrsvermeidung, und der Stromverbrauch ist dann geringer als in den anderen Green-Szenarien. Der Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 in GreenSupreme liegt national und international jeweils um 43 % niedriger als beispielsweise in GreenEe2.

**Tabelle 39: EEV nach Energieträgern**

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenSupreme	GreenEe2	GreenSupreme	GreenEe2	GreenSupreme
Kraftst. Straße PV	398	250	212	126	73	45	26
Kraftst. Straße GV	193	125	113	66	54	37	23
Kraftst. Schiene + Binnenschiff	8	6	6	6	5	5	3
Kraftst. Flug nat.	10	7	6	6	3	4	0
Strom Straße PV	0	18	26	49	58	63	52
Strom Straße GV	0	9	8	31	28	38	34
Strom Straße Schiene	12	14	15	15	16	15	17

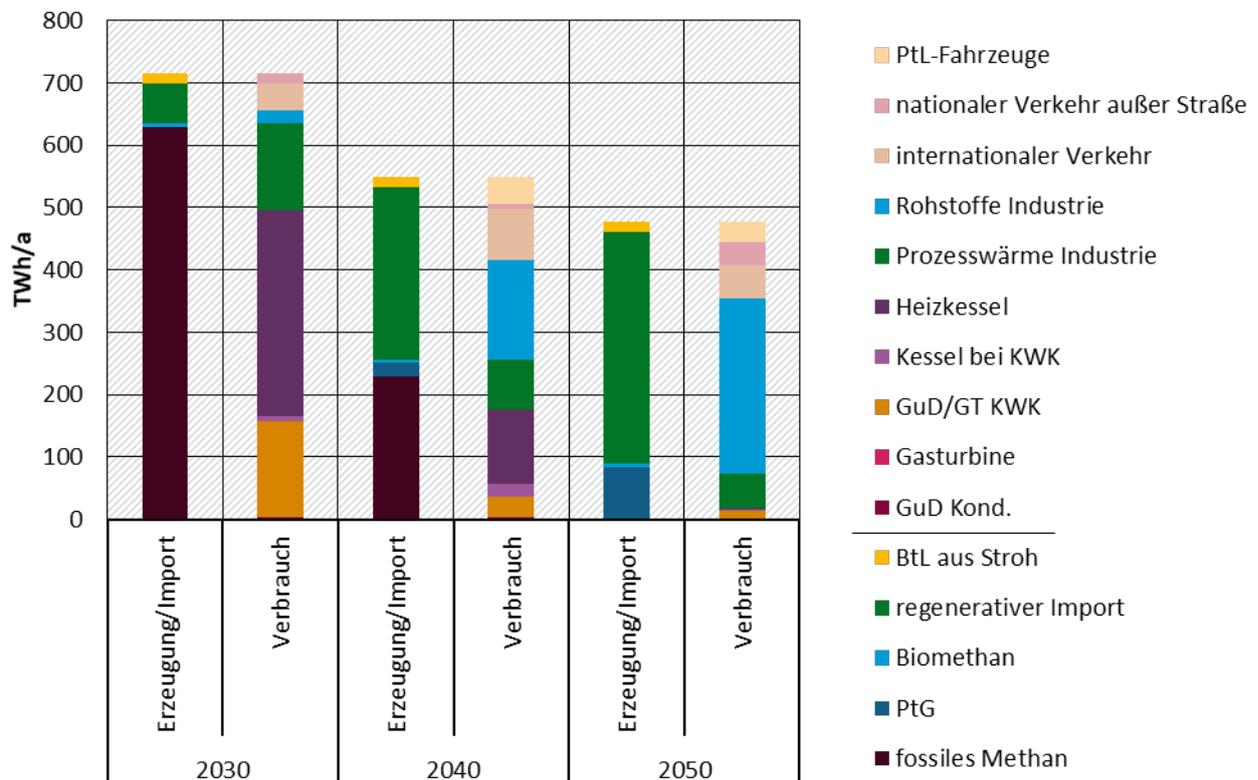
TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenSupreme	GreenEe2	GreenSupreme	GreenEe2	GreenSupreme
Kraftst. Internat.	114	125	111	108	83	92	52
<b>Kraftstoff nat.</b>	<b>609</b>	<b>388</b>	<b>336</b>	<b>203</b>	<b>135</b>	<b>91</b>	<b>52</b>
<b>Strom</b>	<b>12</b>	<b>41</b>	<b>48</b>	<b>94</b>	<b>101</b>	<b>116</b>	<b>104</b>
<b>Kraftstoff Summe</b>	<b>723</b>	<b>513</b>	<b>447</b>	<b>311</b>	<b>218</b>	<b>183</b>	<b>104</b>

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - 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 Verbräuche (Rohstoffe Industrie) ist in Abbildung 9 dargestellt. Dabei wird die schnelle Abnahme des Gesamtverbrauchs an gas- und flüssigförmigen Energieträgern schon bis 2040 und die kontinuierliche Substitution fossiler Kraftstoffe und Erdgas durch PtG/L deutlich.

Abbildung 9: Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und Versorgung



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

Der Bedarf in 2050 an Brenn- und Kraftstoffen ist im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien am niedrigsten. Beispielsweise im Vergleich zu GreenEe2 um - 98 TWh und GreenLate um - 423 TWh. Es zeigen sich langfristig deutliche Einsparung durch die Lebensstiländerung, Null-

Wachstum und Effizienz. Darüber hinaus wird unter diesen Rahmenbedingungen auch weniger Strom benötigt, so dass auch national kostengünstigen Erzeugungspotenziale zur PtG/L-Erzeugung genutzt werden können. Dennoch tritt national eine Sättigung durch die höhere PV-Kosten (mehr Dachflächen) ein. Dementsprechend ist das Verhältnis zwischen PtG/L-Importen zu nationaler PtG/L-Erzeugung langfristig deutlich weniger importabhängig als in den anderen Green-Szenarien. Der Anteil der Importe am Gesamtverbrauch liegt mit 77,6 % niedriger als beispielsweise mit 81 % in GreenEe2 und 91 % in GreenLate.

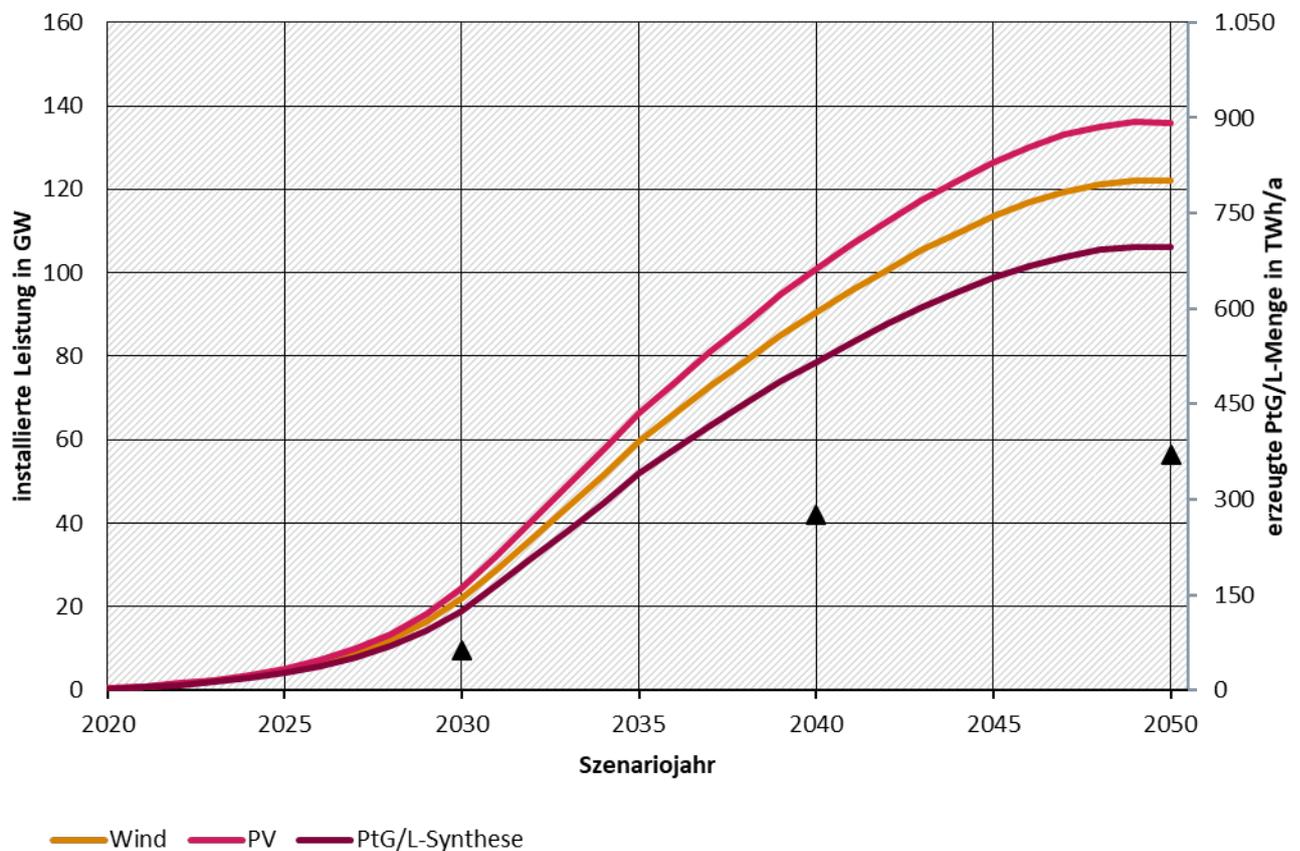
**Tabelle 40: Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenSupreme**

TWh/a		Erdgas	PtG/L-national	PtG/L-Import	Biomethan	BtL aus Stroh	SUMME
2030	GreenSupreme	628,9	0,0	62,9	7,0	15,9	<b>714,7</b>
	GreenEe2	647,9	0,0	22,4	7,0	15,9	<b>693,1</b>
2040	GreenSupreme	229,1	22,3	275,3	5,2	16,8	<b>548,7</b>
	GreenEe2	365,9	0,0	221,5	7,0	16,8	<b>611,1</b>
2050	GreenSupreme	0,0	83,9	371,1	5,2	17,7	<b>477,9</b>
	GreenEe2	0,0	86,6	466,6	5,2	17,7	<b>576,1</b>

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Der für den PtG/L-Import notwendige Infrastrukturaufbau ist in Abbildung 10 dargestellt.

**Abbildung 10: Notwendiger Markthochlauf für eine PtX-Import-Infrastruktur**



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

Im Gegensatz zu den GreenEe-Szenarien, GreenMe und GreenLife wurde eine 0 %-ige Überbauung unterstellt. Trotz der langfristig geringeren PtG/L-Nachfrage sind so die absoluten Importmengen in 2030 und 2040 deutlich größer als in den anderen Green-Szenarien.

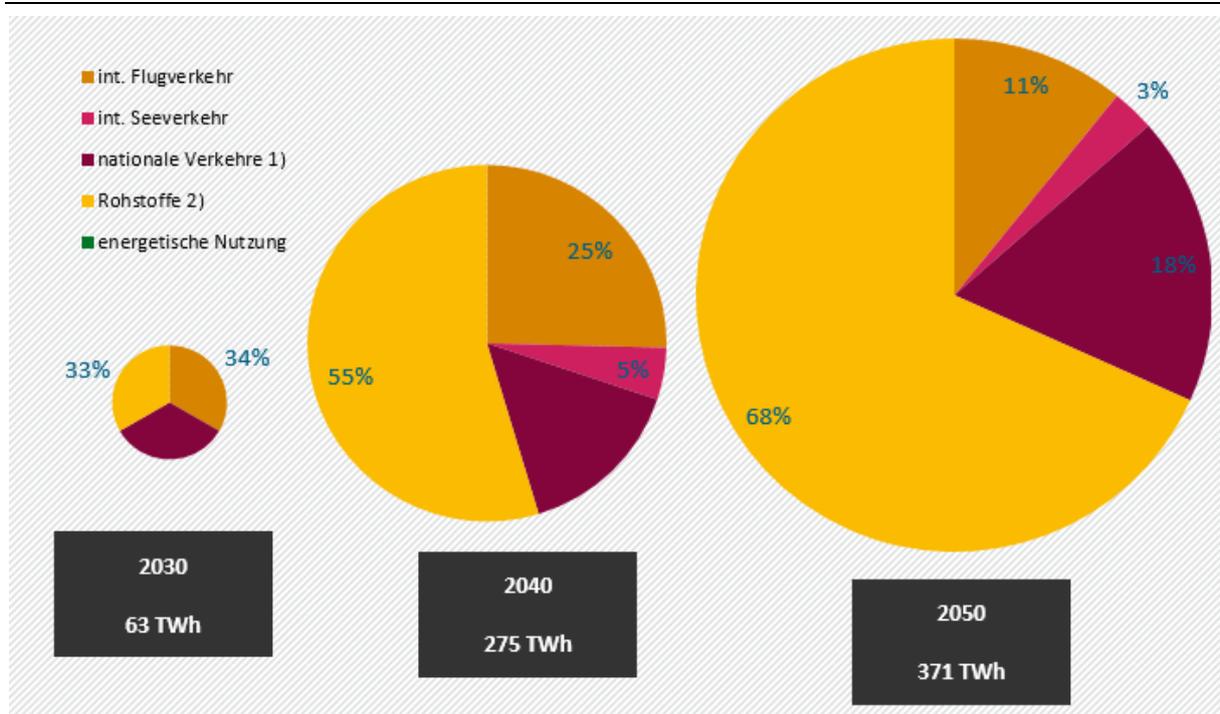
**Tabelle 41: Entwicklung der PtG/L-Importmengen im Vergleich zwischen GreenEe2 und GreenSupreme**

	GreenEe2		GreenSupreme	
	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050
2030	22,3	5 %	62,9	17 %
2040	220,3	47 %	275,3	74 %
2050	466,6	100 %	371,1	100 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Anders als in den anderen Green-Szenarien werden aufgrund des sehr schnellen Markthochlaufs nicht nur die Bedarfe des internationalen Verkehrs und der stofflichen Nutzung gedeckt. Die hohen PtG/L-Importmengen 2040 werden nicht mehr vollständig im internationalen Verkehr und der stofflichen Nutzung benötigt. Somit ist eine energetische Nutzung in den Anwendungsbereichen und damit eine Anrechnung auf das nationale Emissionsziel gegeben. Bereits 2030 wird ein gewisser Markthochlauf im nationalen Absatzmarkt im Bereich Verkehr unterstellt wie in Abbildung 11 dargestellt ist.

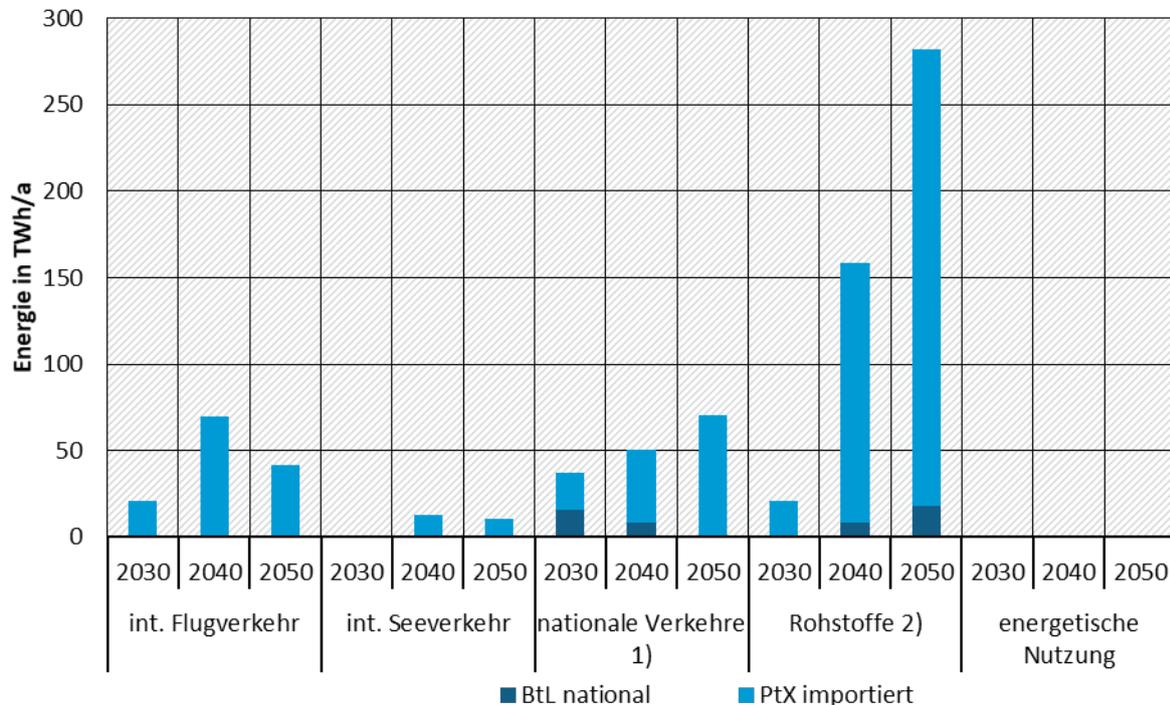
**Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe)**



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – SCOPE; 1) inkl Kraftstoffe GHD (Offroad-Verkehre)  
2) stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie sowie Nutzung als Reduktionsmittel in der Gießerei- und NE-Metallindustrie

Zusätzlich werden Kraftstoffe aus Biomasse im Pfad auch auf das nationale Klimaziel durch eine anteilige Anwendung im nationalen Verkehr angerechnet. Der Vergleich ist in Abbildung 12 dargestellt.

**Abbildung 12: Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert)**



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – SCOPE; 1) inkl Kraftstoffe GHD (Offroad-Verkehre)  
2) stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie sowie Nutzung als Reduktionsmittel in der Gießerei- und NE-Metallindustrie

### 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.

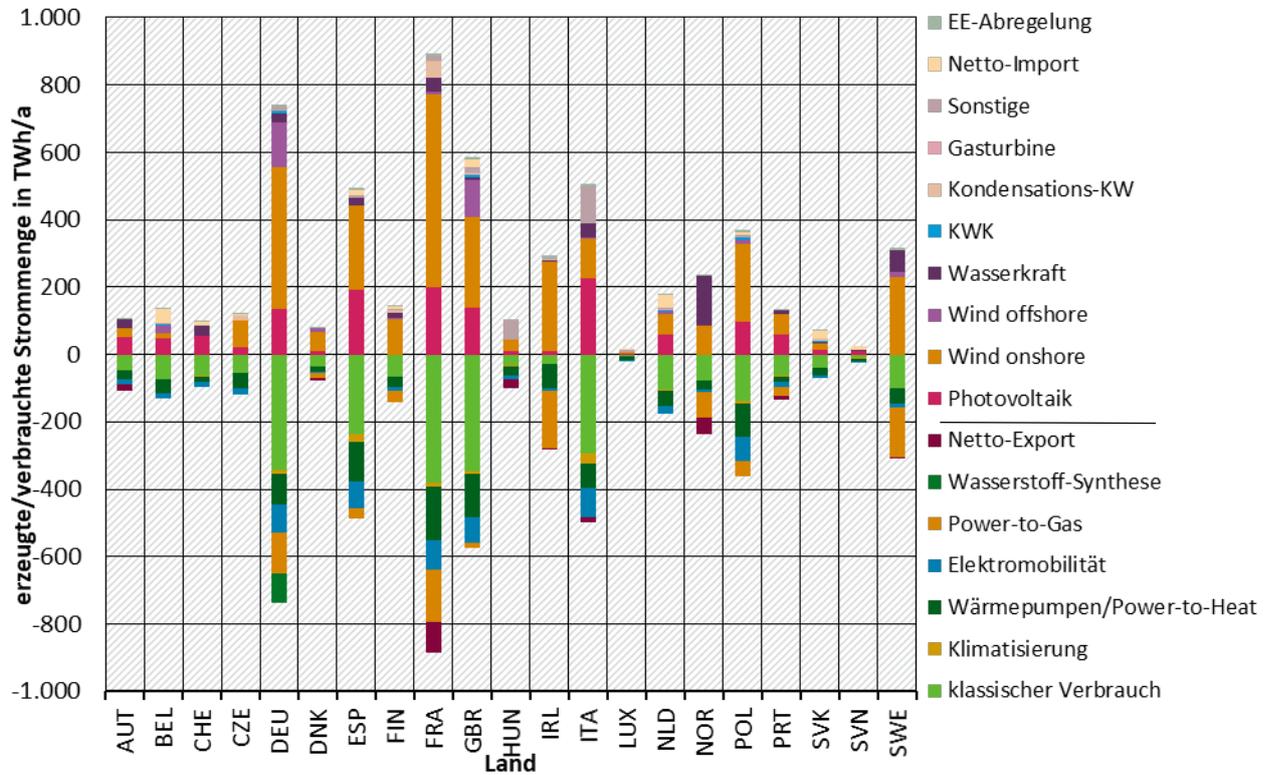
Unter diesen Rahmenbedingungen werden auch die Entwicklungen des europäischen Kraftwerksparkes mit abgebildet und sind nachfolgend dargestellt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Fokus der RESCUE-Studie auf der nationalen Entwicklung in Deutschland lag.

#### 5.1.6.1 Strombilanz

In Abbildung 13 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

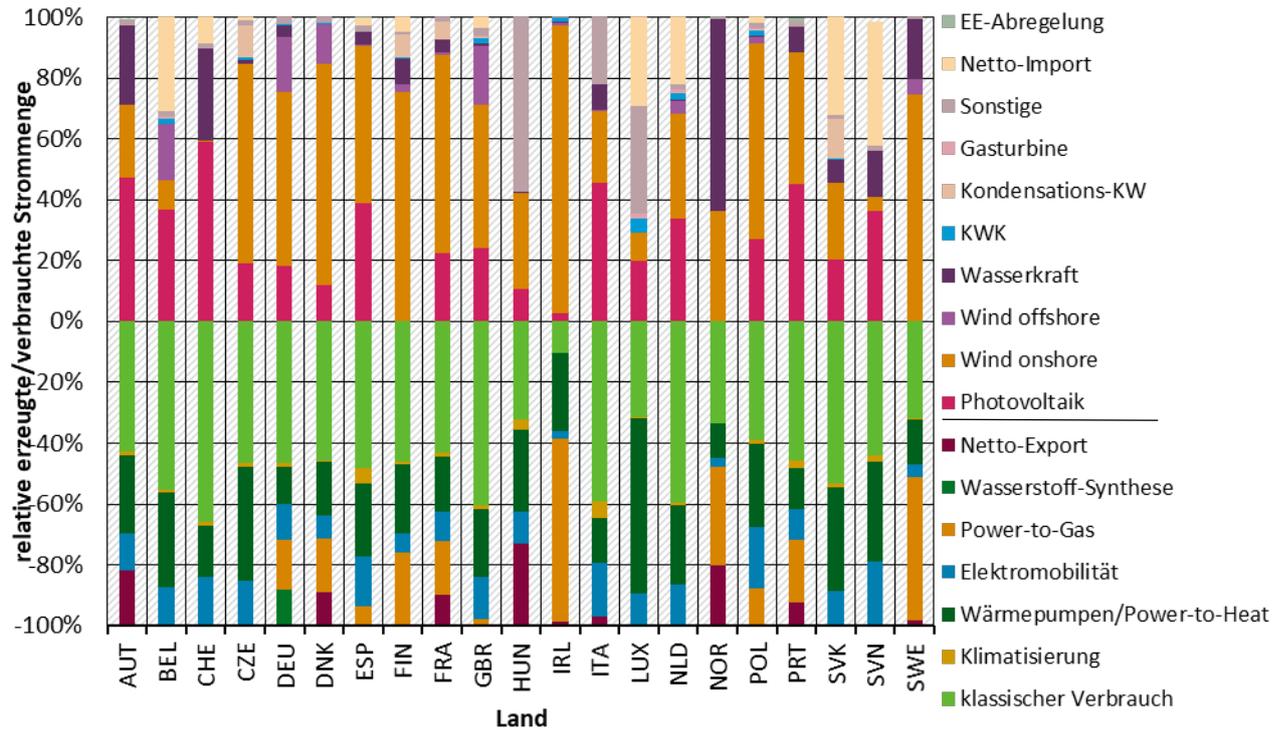
oder Norwegen, während andere Länder, wie Belgien oder Niederlande, auf Stromimporte angewiesen sind. Als ein großes Land weist Großbritannien aufgrund begrenzter Onshore-Potenziale auch einen gewissen Stromimport mit deutlich geringeren Anteil am Gesamtverbrauch auf wie Abbildung 13 zeigt.

**Abbildung 13: Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050**



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

Abbildung 14: Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050

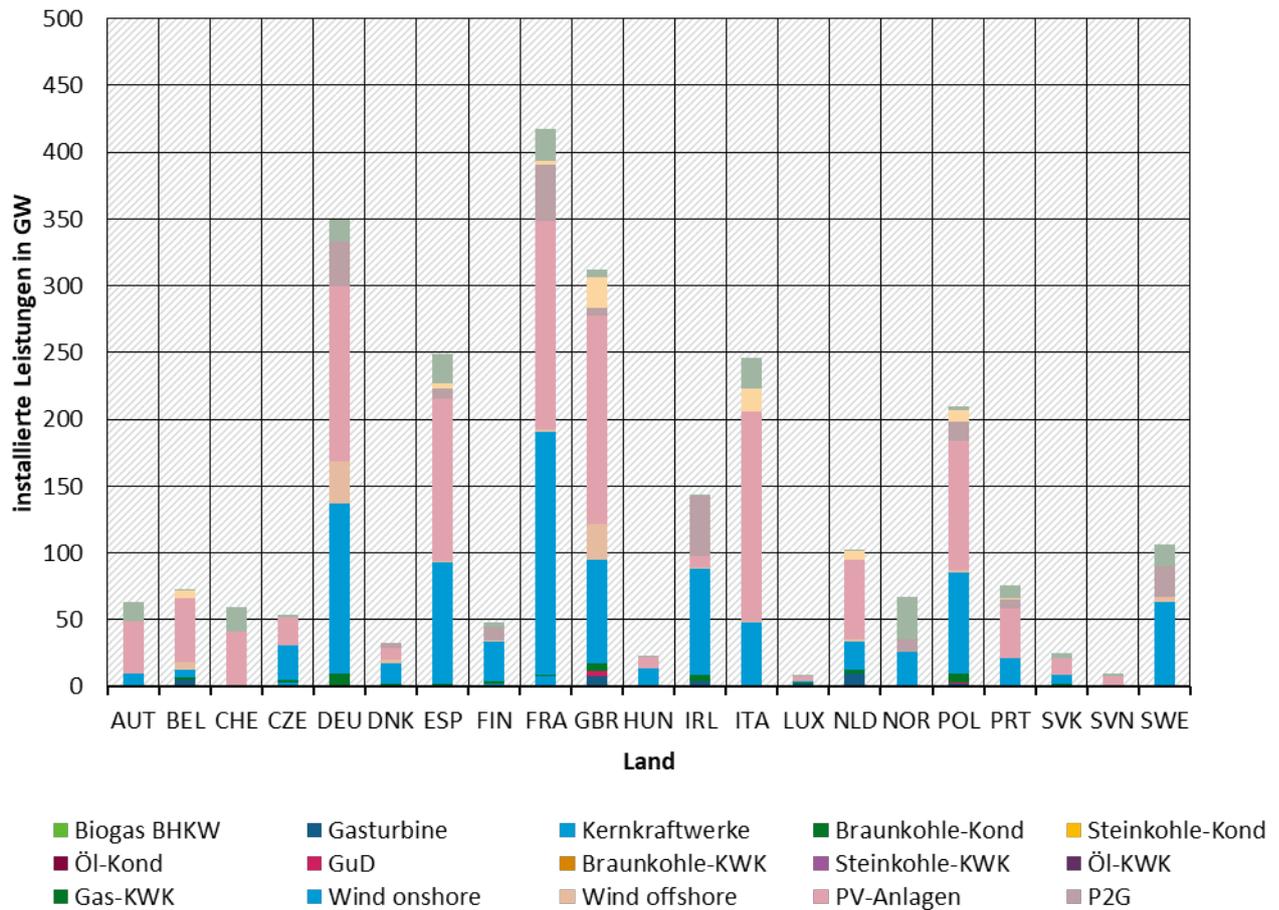


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

### 5.1.6.2 Installierte Leistungen

Die notwendigen installierten Leistungen für diese Stromerzeugung sind in Abbildung 15 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 und Frankreich.

Abbildung 15: Installierte Leistungen Europa 2050 in GreenSupreme



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

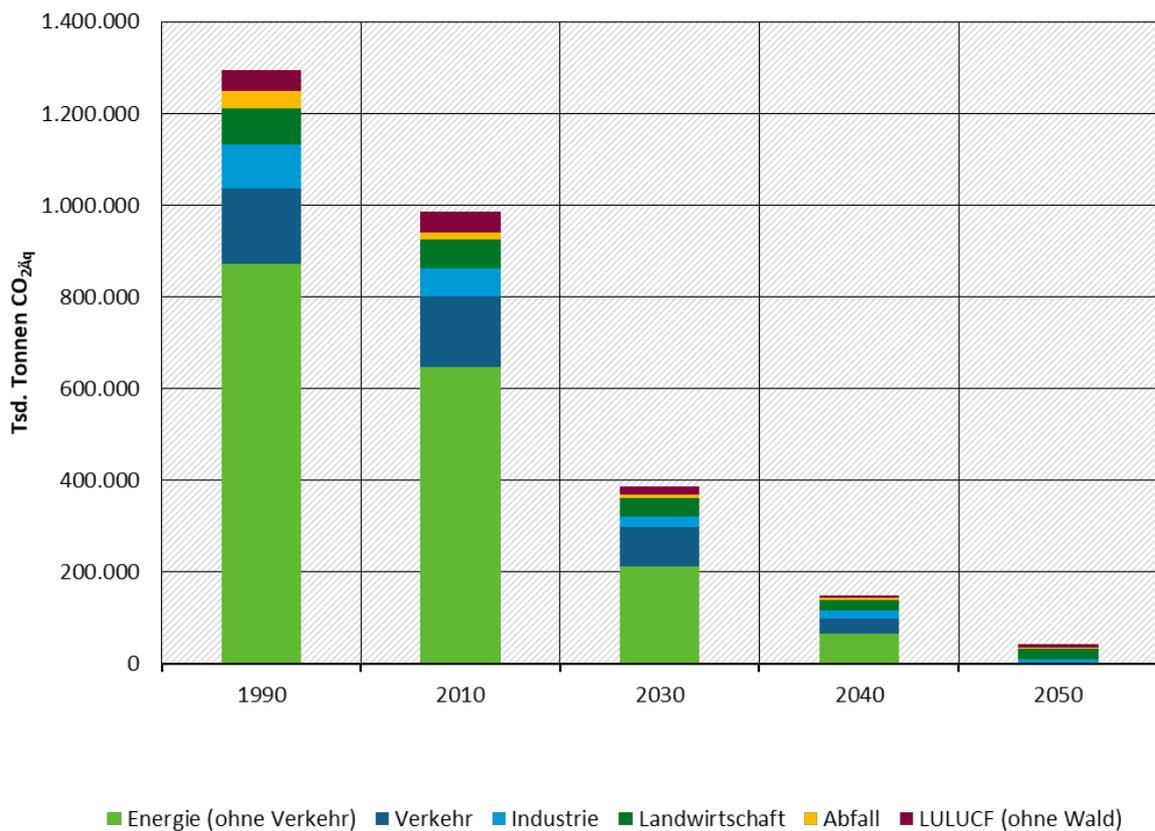
## 5.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

### 5.2.1 Übersicht über die Entwicklung aller Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen in GreenSupreme, einschließlich LULUCF (ohne Wald), betragen 42,915 Mio. t CO<sub>2</sub>Aq in 2050 und gehen damit um 96,7 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück (Abbildung 16). Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 70 % [-88,4 %].

Die THG-Emissionen in GreenSupreme sinken somit stärker als es in den Zielen des Klimaschutzplanes (BMUB 2016a) festgelegt ist, der bis 2030 [2050] nur einen Rückgang um 55 % [80-95 %] vorsieht. Die THG-Emissionen sinken auch im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien, entsprechend der Szenariencharakteristik, schneller.

**Abbildung 16: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050**



Quellen: eigene Darstellung auf der Basis von UBA (2018) 1990-2016 und eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG 2017-2050

Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (85 %, nach NIR-Systematik) (Abbildung 16). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 49 % 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 93 %, 86 % und 90 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 70 %.

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 2019b). Demnach sinken die THG-Emissionen in GreenSupreme bis 2030 in allen Sektoren stärker als es die Ziele des Klimaschutzplanes vorsehen und sogar im Verkehr werden die Sektorziele erreicht (-55 %) (UBA 2019a).

**Tabelle 42: THG-Emissionsminderungen GreenSupreme in 2030 und 2050 gegenüber 1990**

	historisch	GreenSupreme in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq		Rückgang gegenüber 1990 in %	
	1990 <sup>1</sup>	2030 <sup>2</sup>	2050 <sup>2</sup>	Bis 2030 <sup>2</sup>	Bis 2050 <sup>2</sup>
Energie, ohne Verkehr	871,3	217,2	0	-75,1	-100

	historisch	GreenSupreme in Mio. t CO <sub>2Äq</sub>		Rückgang gegenüber 1990 in %	
Verkehr	164,4	80,6	0	-51,0	-100
Industrie	96,4	24,3	10,0	-74,8	-89,6
Landwirtschaft	79,8	40,7	23,9	-49,0	-70,0
Abfall	38	5,9	2,5	-84,6	-93,4
LULUCF, ohne Wald	45,2	19,1	6,5	-57,8	-85,6
<b>Summe</b>	<b>1.295,0</b>	<b>387,9</b>	<b>42,9</b>	<b>-70,0</b>	<b>-96,7</b>

Quellen: <sup>1</sup>(UBA 2019b), <sup>2</sup> ifeu; Unstimmigkeiten gehen auf Rundungen zurück

Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs und des Waldes zu nennen. Im Verkehr setzen sich die THG-Emissionen aus den THG-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt und des Flugverkehrs zusammen. Bis 2030 sinken diese im Flugverkehr (von 22,8 in 2010 auf 19,1 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>) und im internationalen Schiffsverkehr (von 8,2 auf 3,7 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>). In 2040 und 2050 wird der internationale Verkehr ausschließlich mit synthetischen Kraftstoffen versorgt und ist deshalb bilanziell neutral.

Der Wald und die Produkte des Waldes waren zusammengenommen in allen Jahren seit 1990 eine Senke. Für die zukünftige Waldentwicklung ist das WEHAM-Szenario Naturschutz unterstellt, wonach der Wald auch weiterhin eine Senke bleiben und in 2050 etwa 34 Mio. t CO<sub>2</sub> aufnehmen wird (Rüter et al. 2017). Da jedoch die Nachfrage nach Holz und Holzprodukten in GreenSupreme rückläufig ist (siehe Kap. 5.3.2.3), verbleibt mehr Holz im Wald als im WEHAM-Szenario angenommen. Die Senkenwirkung ist damit höher.

## 5.2.2 Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen

### 5.2.2.1 Treibhausgasemissionen im Energiesektor, einschließlich Verkehr

Die THG-Emissionen des Energiesektors (entsprechend der Abgrenzung in der SCOPE-Rechnung) sind im Folgenden entsprechend der Emittenten differenziert dargestellt. Hinzu kommen weitere THG-Emissionen, darunter die flüchtigen THG-Emissionen.

**Tabelle 43: Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO<sub>2Äq</sub>**

		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	0,0	0,0	0,0
	Steinkohle-Kondensationskraftw.	0,0	0,0	0,0
	Braunkohle-KWK-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Braunkohle-Kondensationskraftw.	0,0	0,0	0,0
	Gas-KWK-Kraftwerke	35,0	10,7	0,0
	GuD-Kondensationskraftwerke	0,8	0,6	0,0

		2030	2040	2050
Wärmeerzeugung außer KWK (SCOPE - endogen)	Gasturbinen-Kondensationskraftw.	0,0	0,0	0,0
	Dezentrale Gaskessel HH/GHD	65,5	23,6	0,0
	Dezentrale Ölkessel HH/GHD	6,1	0,0	0,0
	Müll-HKW – Fernwärme	1,4	0,6	0,0
	Gas -Industrie-Prozesswärme	33,9	18,0	0,0
	Braunkohle -Industrie-Prozessw.	2,3	0,0	0,0
	Steinkohle -Industrie-Prozessw.	31,2	0,0	0,0
	Öl -Industrie-Prozesswärme	13,5	6,4	0,0
Verkehr	Ersatzbrennstoff -Industrie-PW	0,3	0,1	0,0
	PKW	54,0	16,0	0,0
	LNF	5,0	1,8	0,0
	LZ/SZ ohne OH-Lkw	16,8	5,9	0,0
	OH-Lkw (Diesel-Anteil)	0,0	0,0	0,0
	Weitere Kraftstoffverbräuche im nationalen Verkehr	4,7	0,0	0,0
Sonstige energetische THG-Emissionen (SCOPE - exogen)	Umwandlungssektor u.a.	25,2	15,1	0,0
	Kraftstoffe GHD	2,1	0,0	0,0
Summe		297,8	99,0	0,0

Quelle: Ifeu/IEE/SSG – SCOPE für Strom und Wärme, TREMOD für Verkehr

### 5.2.2.2 Treibhausgasemissionen der Industrie

Die prozessbedingten THG-Emissionen aus der Industrie betragen im Jahr 2050 insgesamt 10,019 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>. Die energetisch bedingten THG-Emissionen werden wie in den anderen Anwendungsbereichen vollständig vermieden.

Dabei sind in allen Industriezweigen Rückgänge bereits über den Pfad zu verzeichnen (Tabelle 44). In 2050 dominieren die THG-Emissionen der Zementindustrie die prozessbedingten THG-Emissionen mit 50,5 %, gefolgt von der Kalk- und Glasindustrie (26,7 % bzw. 3,5 %). Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr.

**Tabelle 44: Prozessbedingte THG-Emissionen nach Industriesektoren in t CO<sub>2Äq</sub>**

Sektor	2030	2040	2050
Eisen- und Stahlindustrie	1.976.942	162.777	114.084
NE-Metallindustrie	766.409	0	0
Gießereiindustrie	-	-	-

Sektor	2030	2040	2050
Zementindustrie	8.186.568	6.981.637	5.063.511
Glasindustrie	730.086	562.979	356.888
Kalkindustrie	3.469.227	3.052.240	2.678.918
Textilindustrie	0	0	0
Nahrungsmittelindustrie	0	0	0
Papierindustrie	0	0	0
Chemie	6.407.898	3.559.097	0

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

Die THG-Emissionen fluorierter Treibhausgase gehen bis 2050 auf insgesamt 1,1 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> zurück. Sie sind in Tabelle 45 detailliert ausgewiesen.

**Tabelle 45: THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO<sub>2Äq</sub>**

	2030	2040	2050
Aluminium- und Magnesiumindustrie	186.969	180.123	154.541
Produktion fluorierter Treibhausgase	279.320	220.450	306.656
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	125.214	101.998	122.012
Halbleiterproduktion	116.837	109.346	102.898
Elektrische Betriebsmittel	166.000	115.000	51.031
Sonstige SF <sub>6</sub> -Anwendungen	464.000	253.918	253.918
<b>Summe</b>	<b>1.718.566</b>	<b>1.182.061</b>	<b>1.102.578</b>

Quelle: ifeu - eigene Berechnungen auf der Basis von UBA (2019a) und ifeu/IEE/SSG - URMOD

Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,69 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> in 2050 zurück, die einzelnen Quellen sind in Tabelle 46 ausgewiesen. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>.

**Tabelle 46: THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO<sub>2Äq</sub>**

	2030	2040	2050
Anwendung von Farben und Lacken	336.264	226.929	230.412
Entfettung sowie Chemische Reinigung	55.257	38.496	43.125
Herstellung und Anwendung chemischer Produkte	82.206	57.238	64.020

	2030	2040	2050
Andere Anwendungen von Lösemitteln	492.329	335.768	352.711
sonstige Branchen (nicht im Bericht betrachtet)	99.667	69.767	0
<b>Summe</b>	<b>1.065.723</b>	<b>728.198</b>	<b>690.268</b>
Lachgas	13.000	13.000	13.000

Quelle: ifeu - eigene Berechnungen auf der Basis von UBA (2019a) und ifeu/IEE/SSG - URMOD

### 5.2.2.3 THG-Emissionen der Landwirtschaft

Die im Kapitel 4.1 genannten Annahmen führen zu den in Tabelle 47 dargestellten THG-Emissionen.

**Tabelle 47: THG-Emissionen Sektor Landwirtschaft in t CO<sub>2</sub>Äq**

Landwirtschaft	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Tierhaltung / Verdauung	34.664.197	24.653.820	16.494.614	8.345.875	8.345.875
Wirtschaftsdüngermanagement	13.158.304	10.274.520	4.595.180	999.019	999.019
Böden	28.763.506	24.708.817	17.173.696	12.436.151	12.436.151
Kalkung	2.704.013	1.737.636	1.737.636	1.737.636	1.737.636
Harnstoffausbringung	479.601	587.408	486.928	386.449	386.449
Andere	393	1.052.329	181.711	0	0
Summe	52.389.910	38.195.113	40.669.767	23.905.130	23.905.130
Veränderung ggü. 1990		-21,0 %	-49,0 %	-70,0 %	-70,0 %

Quelle: (UBA 2019b) für 1990 und 2010, ifeu/IEE/SSG - ALMOD für 2030, 2040 und 2050; nach (IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006)

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 70 % in 2050 gegenüber 1990. Die größte absolute Änderung geht dabei auf die Tierhaltung zurück (-26,3 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq), die größte prozentuale Änderung verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (-92,4 %).

Der Emissionsrückgang ergibt sich aus dem geringeren Viehbestand in 2050 und damit geringeren THG-Emissionen aus der Verdauung, dem Wirtschaftsdüngermanagement sowie der Bodenbewirtschaftung (durch die geringere Menge an ausgebrachtem Wirtschaftsdünger).

Die Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft beinhalten Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Tabelle 48 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase der Quellgruppe Landwirtschaft nach Art der Treibhausgase.

**Tabelle 48: Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen im GreenSupreme-Szenario Szenario in t CO<sub>2</sub>Äq**

	1990	2010	2030	2040	2050
Kohlendioxid	3.183.610	2.325.040	2.224.565	2.124.085	2.124.085

	1990	2010	2030	2040	2050
Methan	42.737.380	31.807.030	18.825.592	8.392.331	8.392.331
Lachgas	33.849.020	28.882.460	19.619.610	13.388.714	13.388.714

Quelle: (UBA 2019b) für 1990 und 2010, ifeu/IEE/SSG - ALMOD für 2030, 2040 und 2050; nach (IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006)

#### 5.2.2.4 THG-Emissionen im Abfallsektor

Die THG-Emissionen im Abfallsektor gehen auf 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq in 2050 zurück. Tabelle 49 zeigt die weitere Aufschlüsselung nach Untergruppen im Zeitverlauf. Mehr als die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen.

**Tabelle 49: THG-Emissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO<sub>2</sub>Äq**

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		156.000	120.211	101.560	74.441
Kompostierung/Vergärung	41.306	886.831	687.916	584.417	435.043
abflusslose Gruben	3.675.169	84.250	70.208	60.847	42.125
Kläranlagen		2.214.140	1.889.031	1.672.291	1.238.812
<b>Summe</b>	<b>37.966.475</b>	<b>14.016.221</b>	<b>5.850.700</b>	<b>3.902.448</b>	<b>2.490.421</b>

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

#### 5.2.2.5 THG-Emissionen im Bereich LULUCF

Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq in 2050 zurück. Die folgende Tabelle 50 zeigt die THG-Emissionen der einzelnen Untergruppen. Die verbleibenden THG-Emissionen entstehen auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen verursacht. In der folgenden Aufstellung ist der Wald, einschl. Produkte und damit die Senkenwirkung, nicht mit bilanziert.

**Tabelle 50: Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO<sub>2</sub>Äq**

	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Acker und Grünland (Reduktion durch Wiedervernässung)	39.054.200	38.088.420	15.235.368	4.000.000	4.000.000
Torfabbau	4.127.590	4.074.000	0	0	0
Siedlungsfläche	1.885.560	3.267.200	3.011.333	2.840.889	2.500.000
Sonstiges	163	213	0	0	0
<b>Summe (ohne Wald)</b>	<b>43.099.923</b>	<b>45.429.833</b>	<b>19.265.335</b>	<b>6840.978</b>	<b>6.500.000</b>

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

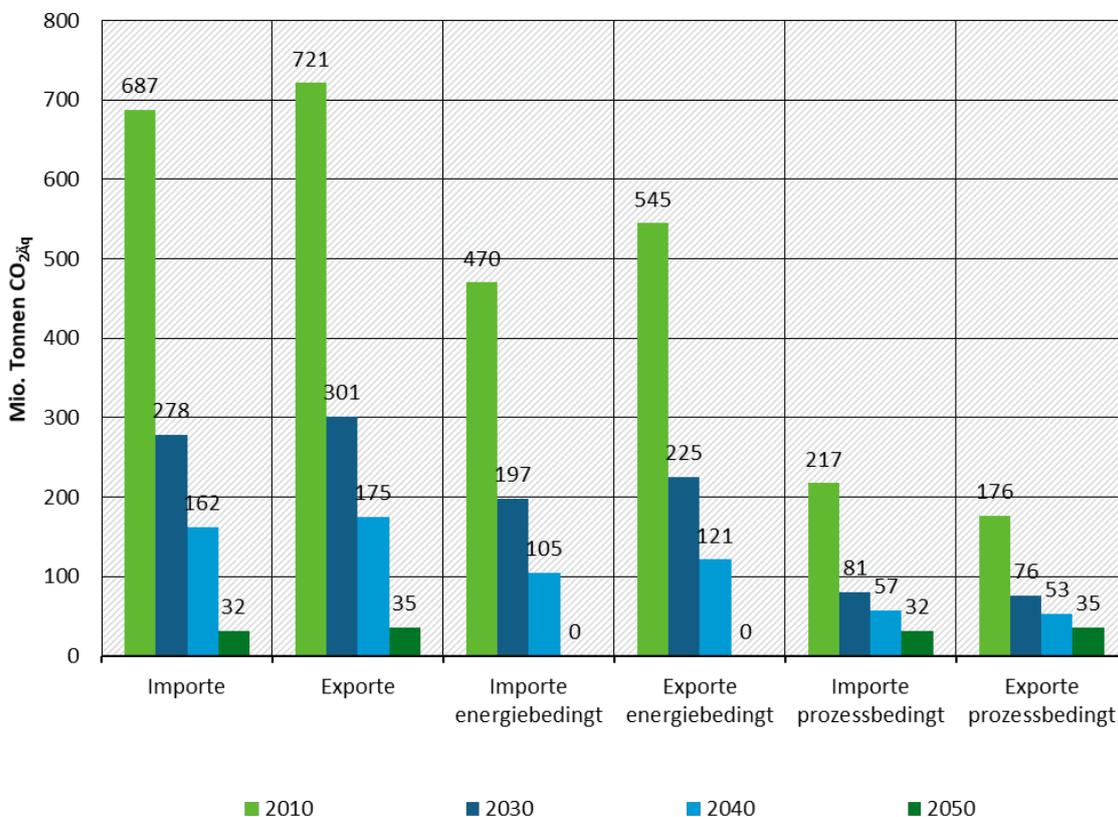
Im Zuge der Szenarienentwicklung ergab sich bezüglich der Wiedervernässung der Moore ein Attributionsproblem: die THG-Emissionen aus wiedervernässten Mooren können nicht auf Null zurückgehen, wie dies noch im THGND-Bericht, bzw. GreenEe angenommen wurde. Auch naturnahe Moore emittieren Treibhausgase (Niedermoore ca. 10 t CO<sub>2</sub>Äq /ha, Hochmoore ca.

3 t CO<sub>2</sub>Äq/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 CO<sub>2</sub>Äq.

### 5.2.3 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 Konzept der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR). 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 – wie in allen Green-Szenarien – bis 2050 rückläufig (Abbildung 17). 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 weder im Inland noch im Ausland energiebedingten THG-Emissionen entstehen. Die THG-Emissionen der Im- und Exporte setzen sich dann nur noch aus nicht-energiebedingten THG-Emissionen zusammen, sie sind dominiert von den Quellgruppen Landwirtschaft und Industrie.

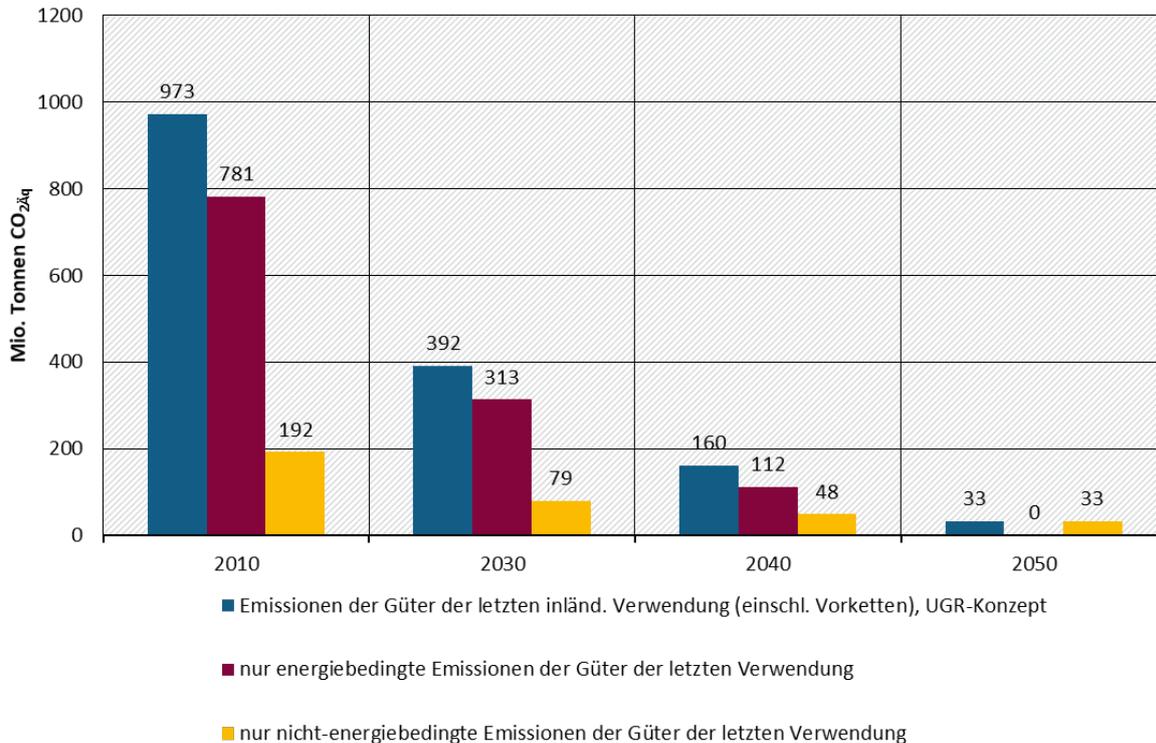
Abbildung 17: THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte, 2010 bis 2050



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

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit rückläufige Treibhausgasemissionen. Diese liegen in 2050 [2030/2040] nur noch bei 33 [392/160] Mio. t CO<sub>2</sub>Äq, was einem Rückgang von 96,6 % 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 des deutschen Konsums höher als die energiebedingten THG-Emissionen.

**Abbildung 18: THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050**

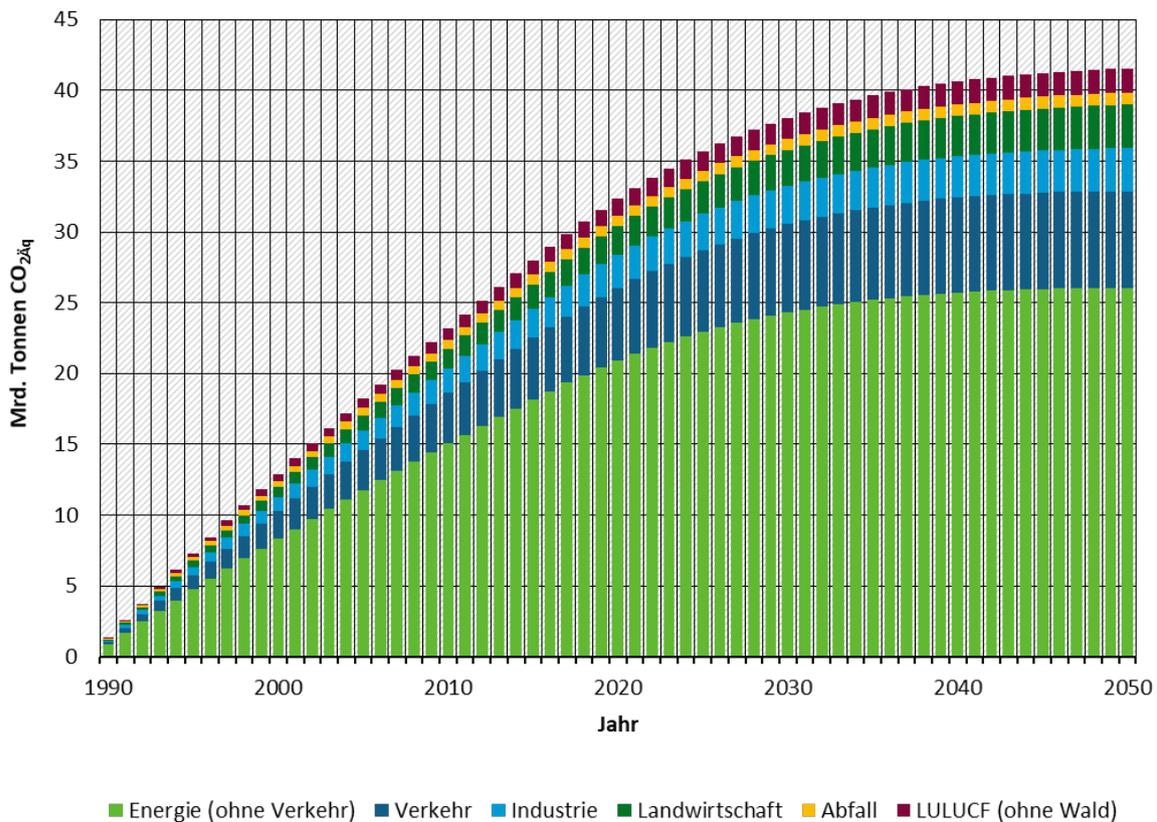


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

#### 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 CO<sub>2</sub>Äq. Bis 2050 kommen im Szenario GreenEe weitere 12,58 Mrd. t CO<sub>2</sub>Äq hinzu. Der Großteil von 9,1 Mrd. t CO<sub>2</sub>Äq entsteht im Zeitraum bis 2030. 62,7 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt (ohne Verkehr), 16,4 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,3 % und auf die Landwirtschaft 7,4 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050.

**Abbildung 19: Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050**



Quellen: eigene Darstellung und eigene Berechnungen basierend auf UBA (2019a) 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 CO<sub>2</sub> im Wald gebunden (Rüter et al. 2017). Dies entspricht einem Anteil von 5,4 % der in GreenSupreme emittierten THG-Emissionen zwischen 2010 und 2050. Eine genaue Quantifizierung konnte im Rahmen des Vorhabens nicht vorgenommen werden, es ist davon auszugehen, dass die Senkenfunktion größer ausfällt (siehe auch UBA (2019a), insb. S. 341ff.).

### 5.2.5 Vergleich der Treibhausgasemissionen mit den GreenEe-Szenarien

Aufgrund der sehr ambitionierten Änderungen in Technik und Gesellschaft in GreenSupreme entstehen im Vergleich zu beiden GreenEe-Szenarien weniger Treibhausgas-Emissionen. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 20,5 % [24,8 %/41,7 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1 (Tabelle 51). Der relevanteste Unterschied mit 93,8 bzw. 58,8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq in 2030 bzw. 2040 ist in der Quellgruppe Energie (ohne Verkehr) zu finden. Die Reduktion der Produktionsmengen auf die Treibhausgasreduktion ist ein Faktor, der insbesondere auf die Reduktion der THG-Emissionen in den Quellgruppen Industrie, Energie und Verkehr Auswirkungen hat. Auf die zusätzlichen Änderungen der ressourceneffizienten Technologien und Lebensstile gehen in 2030/2040 und 2050 Reduktionen von 21,9/38,1 bzw. 3,6 % der Treibhausgasemissionen insbesondere in den Quellgruppen Landwirtschaft und Abfall zurück. Bereinigt um den Einfluss des internationalen Handels sind die technologischen Änderungen und die Änderung der Lebensstile insbesondere im Verkehr 2040 spürbar mit einem Rückgang von -54,4 % gegenüber GreenEe2 (Tabelle 52).

**Tabelle 51: Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenSupreme und GreenEe1 in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq**

	GreenSupreme			GreenEe1			GreenLife ggü. GreenEe1 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Energie ohne Verkehr	217,2	75,2	0,0	307,9	129,2	0,0	-29,5	-41,8	
Verkehr	80,6	23,8	0,0	100,3	52,8	0,0	-19,7	-54,9	
Industrie	24,3	16,2	10,0	30,8	25,0	16,2	-20,9	-35,0	-38,1
Landwirtschaft	40,7	23,9	23,9	51,5	39,1	28,4	-21,1	-38,8	-15,8
Abfall	5,9	3,9	2,5	6,0	4,2	2,9	-3,2	-6,9	-14,2
LULUCF (ohne Wald)	19,3	6,8	6,5	19,3	6,8	6,5	0,0	0,0	0,0
<b>Summe</b>	<b>387,9</b>	<b>149,9</b>	<b>42,9</b>	<b>515,9</b>	<b>257,1</b>	<b>54,0</b>	<b>-24,8</b>	<b>-41,7</b>	<b>-20,5</b>

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG

**Tabelle 52: Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenSupreme und GreenEe2 in Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>Äq**

	GreenSupreme			GreenEe2			GreenLife ggü. GreenEe2 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Energie ohne Verkehr	217,2	75,2	0,0	296,6	119,7	0,0	-26,8	-37,2	
Verkehr	80,6	23,8	0,0	99,7	52,1	0,0	-19,2	-54,4	
Industrie	24,3	16,2	10,0	27,5	20,8	11,7	-11,6	-22,1	-14,6
Landwirtschaft	40,7	23,9	23,9	52,4	38,2	26,5	-22,4	-37,4	-9,7
Abfall	5,9	3,9	2,5	6,0	4,2	2,9	-3,2	-6,9	-14,2
LULUCF (ohne Wald)	19,3	6,8	6,5	19,3	6,8	6,5	0,0	0,0	0,0
<b>Summe</b>	<b>387,9</b>	<b>149,9</b>	<b>42,9</b>	<b>501,6</b>	<b>241,9</b>	<b>47,6</b>	<b>-22,7</b>	<b>-38,0</b>	<b>-9,9</b>

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG

Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenSupreme um 2,67 Mrd. Tonnen CO<sub>2Äq</sub> (6,0 %) niedriger als in GreenEe1 und um 2,31 Mrd. Tonnen CO<sub>2Äq</sub> (5,3 %) niedriger im Vergleich zu GreenEe2. In keinem anderen Green-Szenario liegen die kumulierten Treibhausgas-Emissionen so niedrig wie in GreenSupreme. Dies gilt insbesondere auch für den Pfad. So liegen bereits in 2030 die kumulierten THG-Emissionen in GreenSupreme 0,96 bzw. 0,85 Milliarden Tonnen CO<sub>2Äq</sub> unter den THG-Emissionen in GreenEe1 bzw. GreenEe2 (-2,5 % bzw. -2,2 %).

## 5.3 Der Konsum von Rohstoffen

### 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 411,0 [763,1/ 568,1] Mio. Tonnen Rohmaterialäquivalente (RME). Dies ist ein Rückgang um 70,1 [44,5/ 58,7] % gegenüber 2010 (Tabelle 53).

Im Jahr 2050 haben die mineralischen Rohstoffe den größten Anteil von 53,2 % am RMC, gefolgt von biotischen Rohstoffen (36,5 %) und Metallerzen (10,3 %).

**Tabelle 53: Übersicht über die primären Rohstoffflüsse in 2010 bis 2050 in Rohmaterialäquivalenten (RME)**

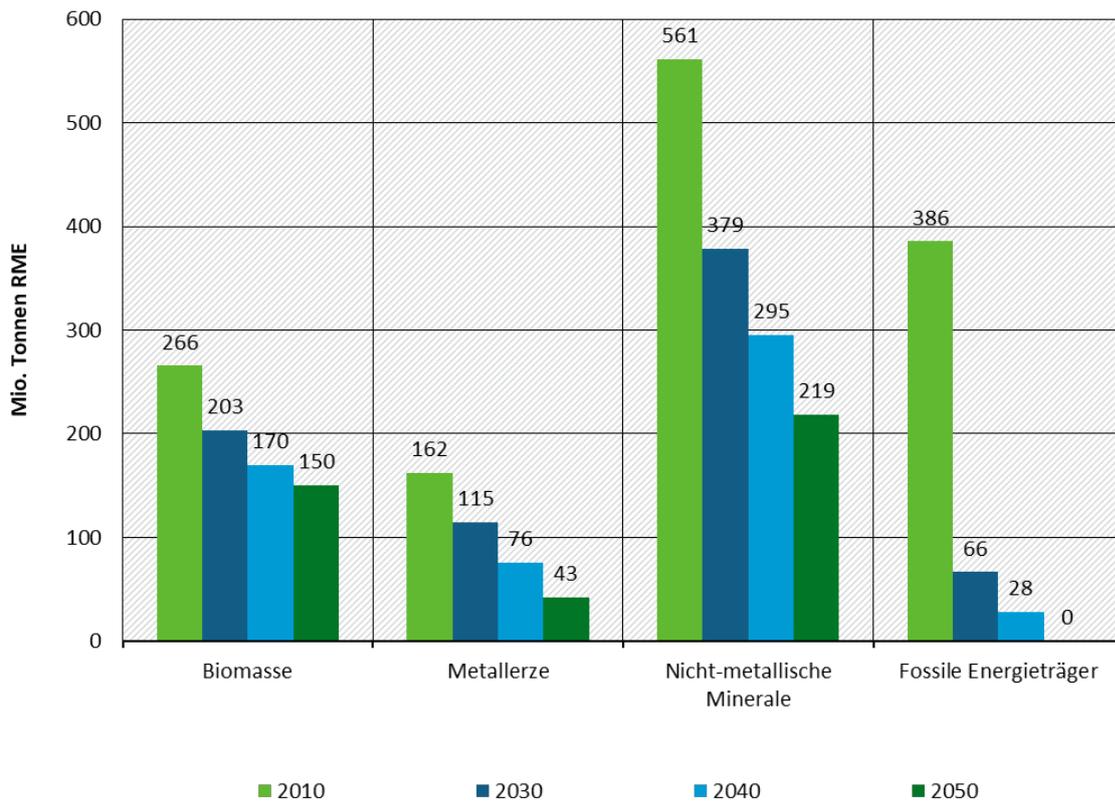
Mio. t RME	Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
<b>2010: Gesamt</b>	<b>1.021,3</b>	<b>1.669,3</b>	<b>2.690,6</b>	<b>1.316,1</b>	<b>1.374,5</b>
Biomasse	249,2	173,5	422,7	157,2	265,5
Metallerze	0,4	663,7	664,1	502,0	162,1
Nicht-metallische Mineralien	575,6	262,3	837,9	276,8	561,1
Fossile Energieträger	196,1	569,8	765,8	380,1	385,7
<b>2030: Gesamt</b>	<b>646,9</b>	<b>918,4</b>	<b>1565,3</b>	<b>802,1</b>	<b>763,1</b>
Biomasse	199,1	147,8	346,9	143,6	203,3
Metallerze	0,3	526,7	527,0	412,0	115,0
Nicht-metallische Mineralien	438,7	134,3	573,0	194,5	378,5
Fossile Energieträger	8,9	109,5	118,4	52,0	66,4
<b>2040: Gesamt</b>	<b>525,0</b>	<b>724,0</b>	<b>1249,0</b>	<b>680,9</b>	<b>568,1</b>
Biomasse	165,0	136,6	301,6	131,9	169,7

Mio. t RME	Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
Metallerze	0,2	402,0	402,2	326,7	75,5
Nicht-metallische Mineralien	359,9	123,4	483,2	188,3	295,0
Fossile Energieträger	0,0	62,0	62,0	34,0	27,9
<b>2050: Gesamt</b>	<b>459,0</b>	<b>462,9</b>	<b>921,9</b>	<b>510,9</b>	<b>411,0</b>
Biomasse	167,1	111,0	278,1	128,2	149,9
Metallerze	0,2	258,5	258,6	216,1	42,5
Nicht-metallische Mineralien	291,7	93,4	385,2	166,6	218,6
Fossile Energieträger	0,0	22,9	22,9	17,0	5,9

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die im Zuge der zuvor beschriebenen Transformation um 100 % zurückgehen (Abbildung 20). Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (-82,8 %). Weder im Inland noch im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 fossilen Energieträger verwendet. Der zweitstärkste Rückgang ist bei den Metallerzen zu verzeichnen (-73,8 %), wichtige Gründe für den Rückgang liegen in der Erhöhung der Recyclingquoten, der hohen Materialeffizienz und in der Reduktion der Nachfrage nach metallhaltigen Gütern, darunter Fahrzeuge. Der RMC für nicht-metallischen mineralischen Rohstoffe vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um -61,0 % und ist unter anderem geprägt vom Rückgang der Baunachfrage und Bauaktivität im Hoch- und Tiefbau und den angenommenen Substitutionen von mineralischen Baumaterialien. Der RMC für Biomasse geht zwischen 2010 und 2050 um insgesamt 43,5 % zurück, relevante Faktoren sind die Umstellung der Diäten und der rückläufige Holzverbrauch. Der Rückgang des RMC verläuft bei den mineralischen, metallischen und biotischen Rohstoffen stetig.

**Abbildung 20: Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050**

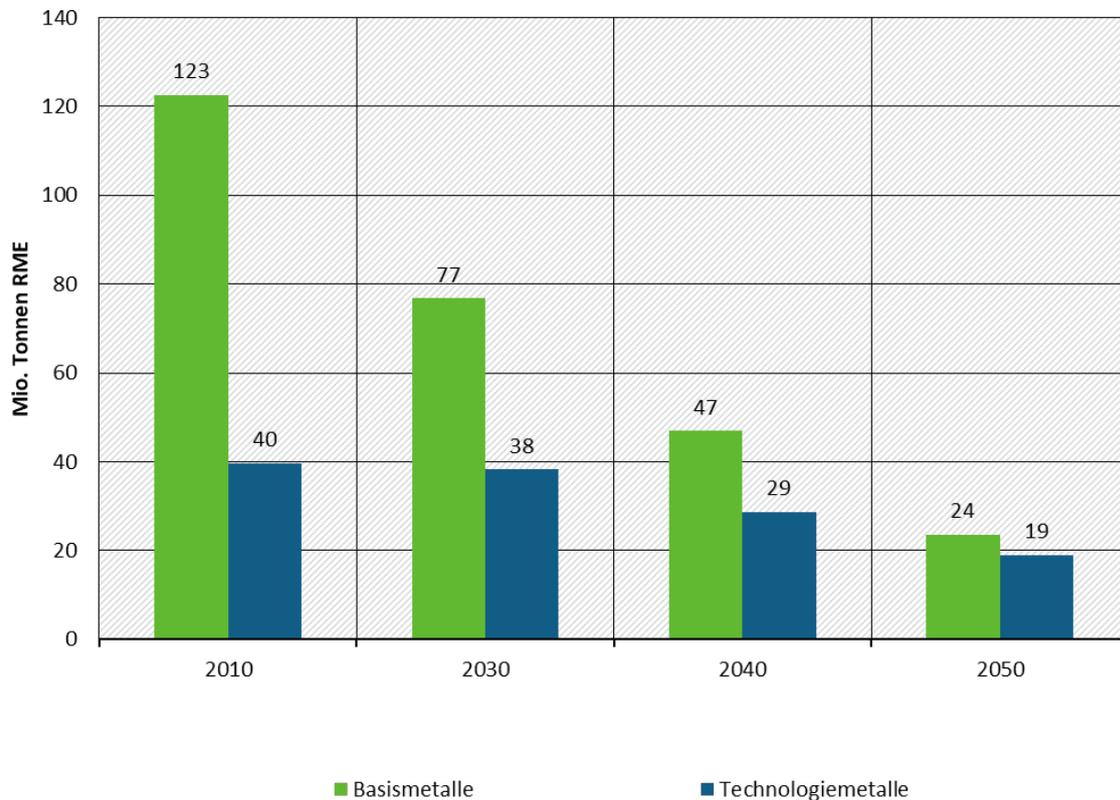


Quelle: eigene Darstellung eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der im Zeitverlauf kontinuierliche Rückgang des RMC der Metallerze verdeckelt, dass innerhalb der Gruppe der Metalle deutliche Verschiebungen stattfinden. Die Basismetalle Eisen, Kupfer und Aluminium stellen in 2010 im RMC in der Kategorie der Metalle den weitaus größten Anteil von 75,6 %, während ihr Anteil in 2050 nur noch bei 55,3 % liegt (Abbildung 21). Dabei ist die nachgefragte Menge nach Basismetalle zurückläufig. Gleichzeitig ist die Nachfrage nach Technologie- und Edelmetallen<sup>5</sup> bis 2030 fast konstant und geht bis 2050 zurück.

<sup>5</sup> 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 21: Letzte inländische Verwendung der Basis- und Technologie- bzw. Edelmetalle, 2010 bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung eigener Modellierungsergebnisse 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  $DMI_{\text{abiotisch}}$ . 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.

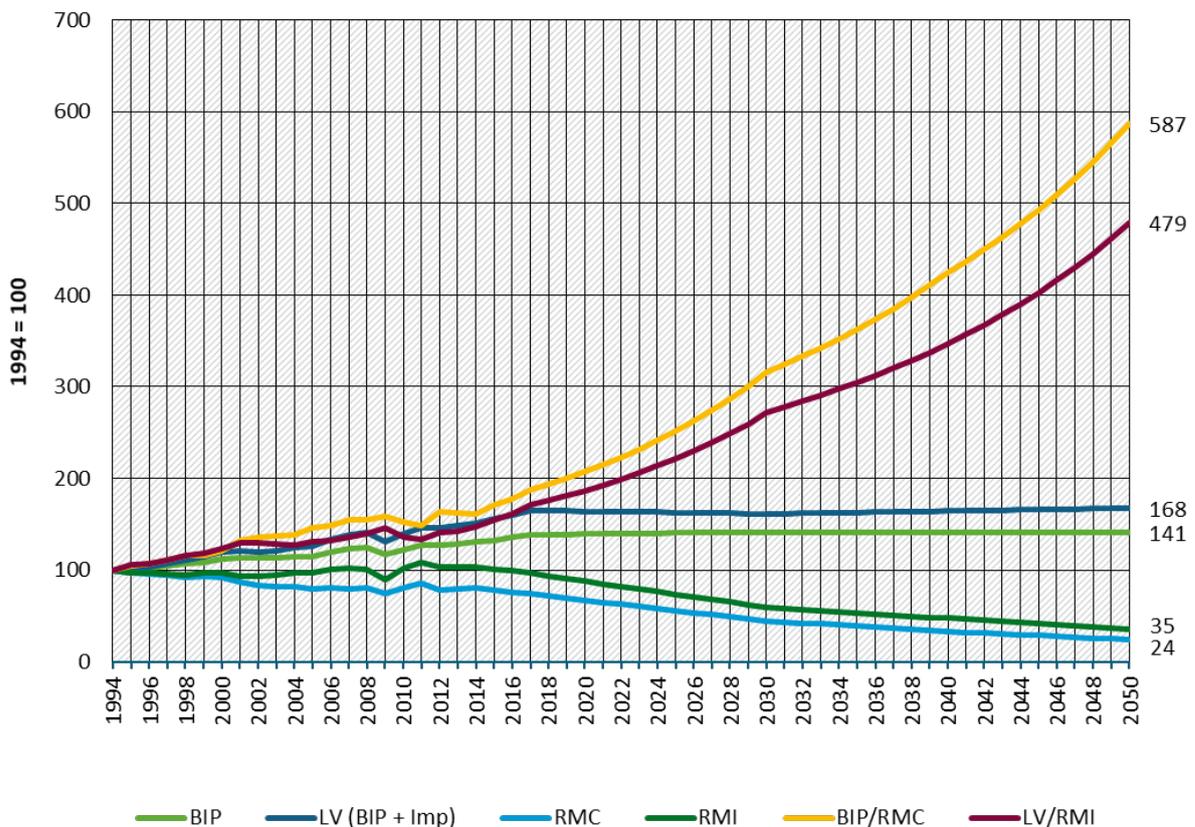
Der international eher übliche Indikator ist die Rohstoffproduktivität (BIP/ DMC bzw. BIP/RMC). Die Gesamtrohstoffproduktivität ist in Deutschland ein Zielindikator.

Abbildung 22 vergleicht die Entwicklung ausgewählter Rohstoffindikatoren 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 2020, danach bis 2030 auf Null zurückgehend und eine Wachstumsbefreiung (kein Wachstum) in den Folgejahren entspricht der für das Szenario getroffenen Annahme. Der RMC vermindert sich 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 sehr 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 35 und der RMC auf 24 Indexpunkte bis 2050.

Die Gesamtrohstoffproduktivität (LV/RMI) liegt in 2050 um 379 Indexpunkte höher als im Jahr 1994. Die Rohstoffproduktivität, gemessen als Verhältnis zwischen BIP und RMC, steigt um 487 Indexpunkte im Vergleich zu 1994.

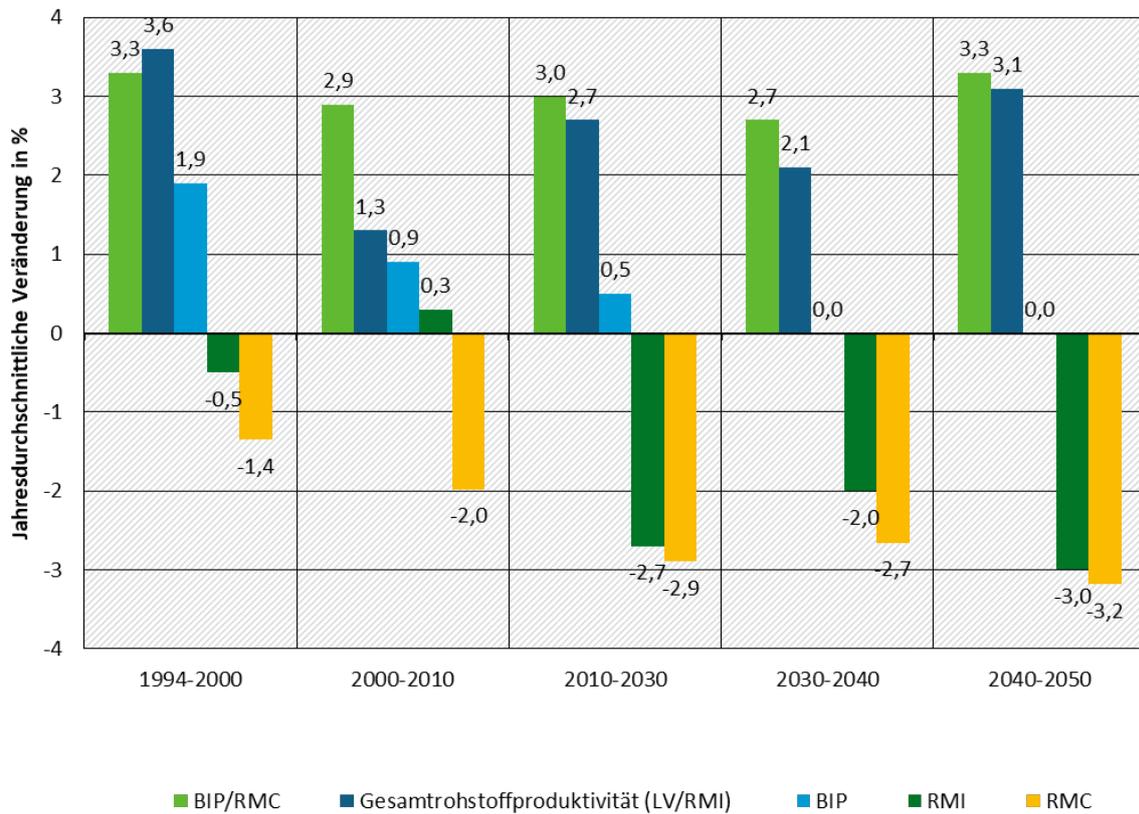
**Abbildung 22: Entwicklung von ausgewählten Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse 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 (EWMFA, (Destatis 2018a)). Ab 2016 lineare Interpolation zwischen den Stützjahren und dem Zieljahr.

Die jahresdurchschnittlichen Änderungen sind in Abbildung 23 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 -2,0 bis -3,0 % p.a. deutlich vermindert. Ursächlich für die Differenzen ist, wie bereits erwähnt, vor allem die unterschiedliche Entwicklung der Außenhandelsverflechtung. Insgesamt steigt die Gesamtrohstoffproduktivität, zunächst um 2,7 bzw. 2,1 % pro Jahr und ab 2040 durchschnittlich um 3,1 % pro Jahr. Die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität ist somit über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRes II oder ProgRes III (BMU 2020; BMUB 2016b) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2018).

**Abbildung 23: Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität, 1994 bis 2050**

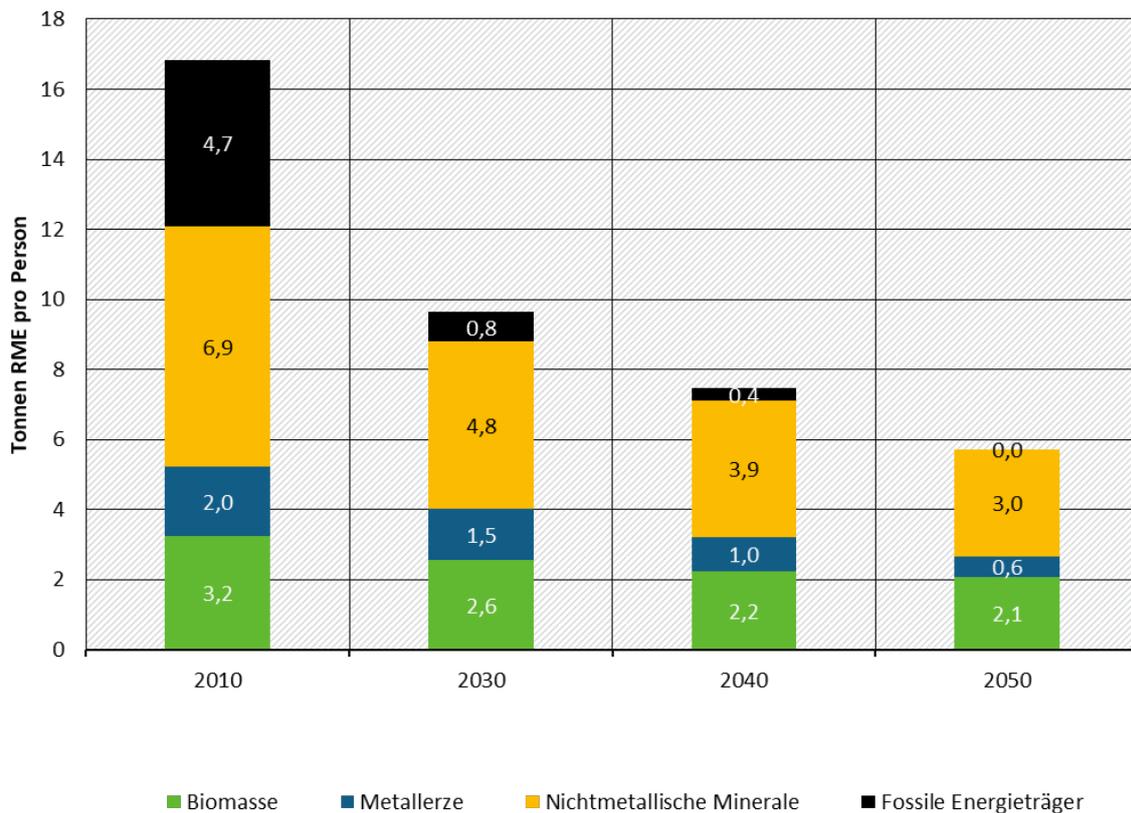


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – URMOD; für 2010, 2030, 2040 und 2050 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA, (Destatis 2018a)). Ab 2016 lineare Interpolation zwischen den Stützjahren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

### 5.3.1.3 Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen beläuft sich im Jahre 2050 auf 5,72 Tonnen p.a., was einem Rückgang von 66,0 % im Vergleich zu 2010 entspricht (Abbildung 24). Zum Vergleich: der global durchschnittliche Rohstoffkonsum lag bei 10 Tonnen in 2010 (UNEP 2016) bzw. 12 Tonnen in 2015.

**Abbildung 24: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person, 2010 bis 2050**



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

Der Pro-Kopf-Konsum von primärer Biomasse verringert sich zwischen 2010 und 2050 von 3,2 auf 2,1 Tonnen. Dies ist eine Größenordnung, die auch in Ländern mit einem geringen Anteil tierischer Produkte in der Nahrung gemessen wird. Der Wert für Metalle (0,6 Tonnen) liegt unter anderem aufgrund der Recyclinganstrengungen unter dem gegenwärtigen globalen Durchschnitt von 1,1 Tonnen pro Person (UNEP 2016). Der Konsum von nicht-metallischen mineralischen Rohstoffen (3,0 Tonnen) liegt unter dem gegenwärtigen globalen Durchschnittswert von 4,4 Tonnen pro Person. Die Höhe zeigt vor allem, welche Materialinputs für die Aufrechterhaltung der mengenmäßig überwiegend auf nicht-metallischen Mineralien beruhenden Technosphäre trotz vieler Anstrengungen weiterhin benötigt werden.

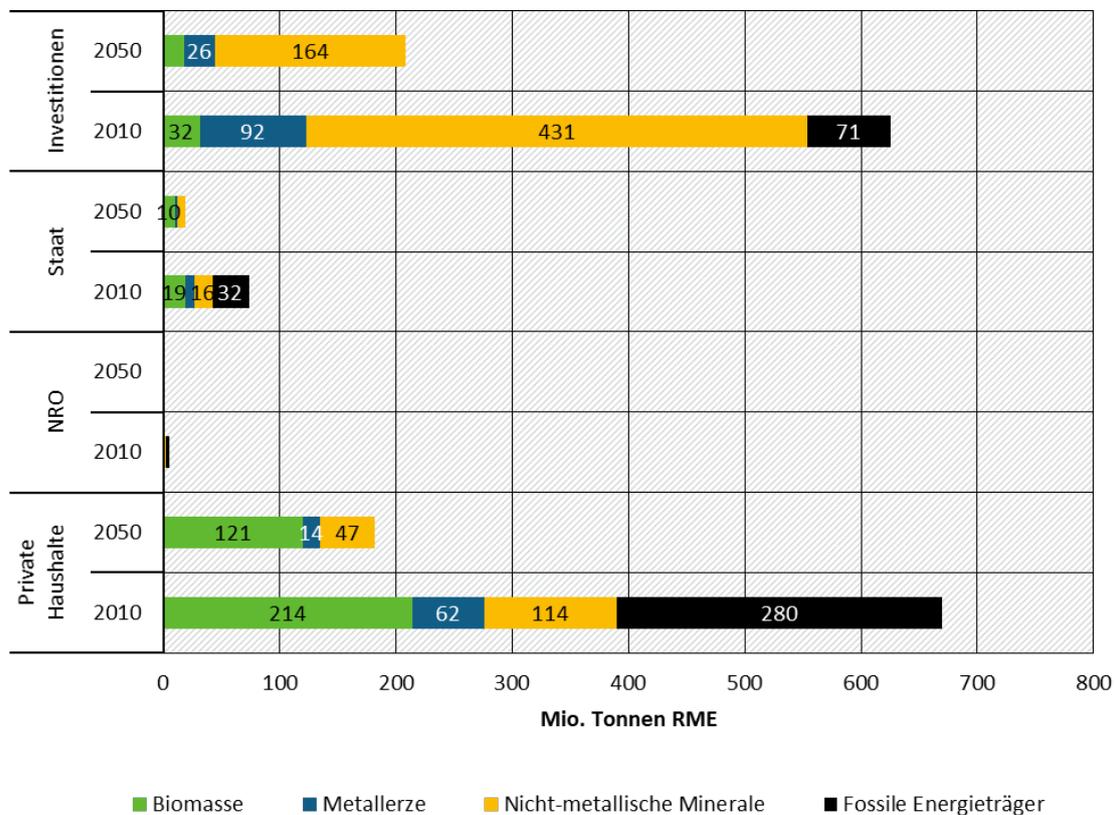
#### 5.3.1.4 Der Rohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfelder in 2050

In 2050 werden rund 209 Millionen Tonnen Rohstoffe (in Rohmaterialäquivalenten) in Bauwerken, Infrastrukturen und Anlagen investiert, das heißt längerfristig gebunden (Abbildung 25). Die Investitionen werden von nicht-metallischen Mineralen dominiert, die 78,8 % der Rohstoffe der Investitionen ausmachen. Weitere 12,4 % der Rohstoffaufwendungen sind Metallerze, die Anteile der Biomasse sind geringer (8,8 %). Zwischen 2010 und 2050 gehen die Rohstoffaufwendungen für Investitionen um 66,6 % zurück.

Die privaten Haushalte konsumieren 182,3 Millionen Tonnen Rohstoffe in 2050, was einem Rückgang um 72,8 % im Vergleich zu 2010 entspricht. Den größten Anteil stellt in 2050 die Biomasse mit 66,2 %, gefolgt von nicht-metallischen Mineralen (25,9 %) und Metallerzen (7,9 %).

Der Konsum des Staates und der Nichtstaatliche Organisationen ist vergleichsweise gering mit 18,9 bzw. 1,3 Millionen Tonnen. Der Rückgang gegenüber 2010 beträgt 74,6 % bzw. -74,6 %.

**Abbildung 25: Der RMC nach Verwendungskategorien in 2010 und 2050**



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD; Werte unter 10 werden nicht angezeigt.

Der Konsum privater Haushalte wird in Abbildung 26 entlang der Bedürfnisfelder weiter aufgeschlüsselt. Der größte Anteil der Rohstoffe wird für die Ernährung gebraucht (58 %). Zum Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus, das 15,6 % 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 Biomasse dominiert (86,7 %), abiotische Rohstoffe werden unter anderem für Düngemittel, Haltbarmachung, Zubereitung oder Verpackung der Lebensmittel benötigt. Der Rückgang des Rohstoffkonsums im Bereich Ernährung gegenüber 2010 liegt bei 47,3 %.

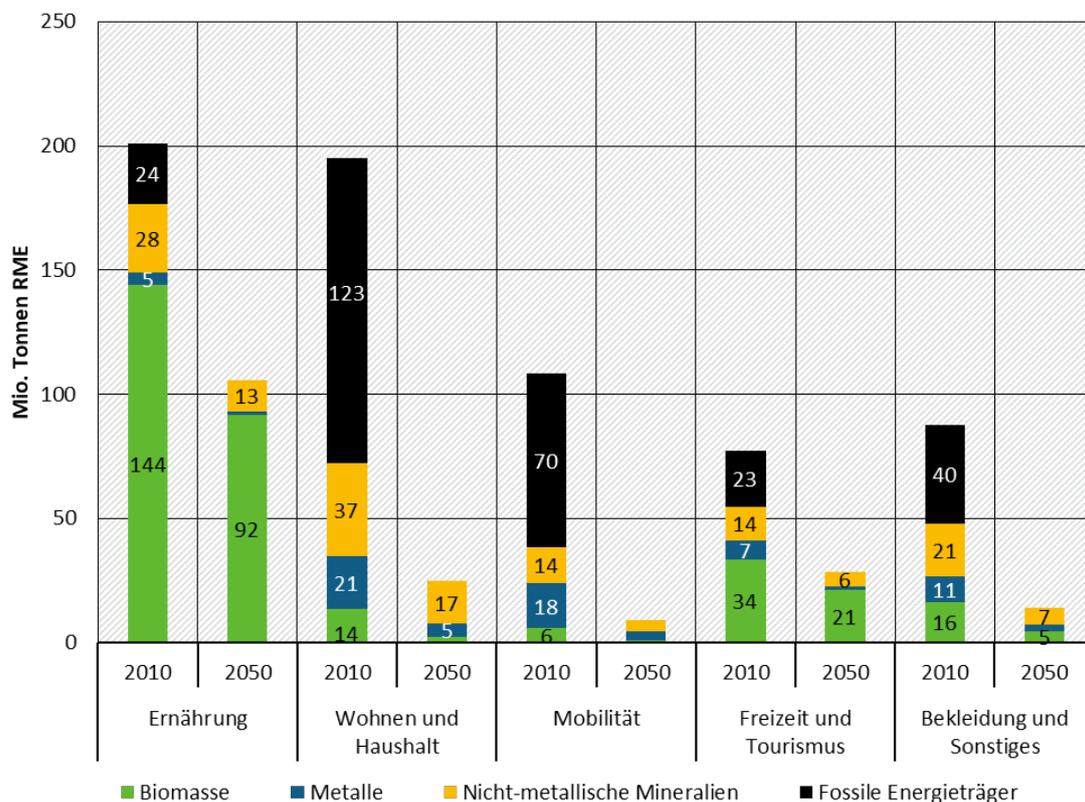
Im Bereich Haushalt und Wohnen werden Rohstoffe nicht nur für Möbel, sondern auch für Reparaturen (z.B. Badsanierung u. ä.) benötigt, wodurch sich der hohe Anteil nicht-metallischer Minerale erklärt. Der Wohnungsbau ist jedoch hier nicht berücksichtigt, da er eine Investition darstellt und dort verortet wird. Insgesamt fragen die privaten Haushalte in dieses Bedürfnisfeld 13,6 % ihres Rohstoffkonsums nach. Der Rohstoffkonsums in diesem Bedürfnisfeld geht um 87,3 % zurück, was vor allem eine Folge der Transformation der Energieinputs im Bereich Wohnen ist.

Im Bedürfnisfeld Mobilität konsumieren private Haushalte nur noch 4,9 % ihres gesamten Rohstoffkonsums, beispielsweise für private PKWs oder den öffentlichen Verkehr (die Verkehrsinfrastruktur ist Teil der Investitionen). Auch in diesem Bedürfnisfeld zeigt sich die Änderung der Energieinputs besonders, wobei auch der Rückgang von Privat-PKWs eine Rolle spielen. Der Rückgang des Rohstoffkonsums gegenüber 2010 liegt bei -91,7 %. Die

Rohstoffaufwendungen für Kleidung und sonstige Produkte belaufen sich auf insgesamt 7,8 %. Auf die Kleidung entfallen insgesamt nur noch 0,56 Mio. Tonnen, das sind 0,26 Mio. Tonnen weniger als in GreenLife und ist zurückzuführen auf die höhere Materialeffizienz in der Produktion im Vergleich zu GreenLife. Auffallend ist der starke Rückgang bei der Bekleidung gegenüber 2010, der unter anderem durch die Annahme des Aufholens im Rest der Welt auf die deutsche Technologie zustande kommt und für alle Green-Szenarien gilt: die Textilien in Deutschland werden zu einem hohen Anteil aus synthetischen Stoffen hergestellt, die in 2050 im Wesentlichen auf der Basis von CO<sub>2</sub> aus der Luft und Wasser hergestellt werden und entsprechend den Konventionen der Materialflussrechnungen nicht berücksichtigt werden. Diese Technologie wird nun auch anteilmäßig auf die Änderungen im Ausland übertragen. Im Ergebnis geht der Anteil z.B. von Baumwollbekleidung stark zurück und der Import von synthetischer Bekleidung (auf der Basis von erneuerbaren Rohstoffen) steigt.

Die Aufwendungen für Kleidung und sonstige Produkte und Dienstleistungen liegen bei 7,8 % des privaten Konsums. Die Rohstoffaufwendungen gehen unter den beschriebenen Annahmen zur Änderung des Konsumverhaltens um insgesamt 83,9 % gegenüber 2010 zurück.

**Abbildung 26: Der Konsum der privaten Haushalte nach Bedürfnisfelder in 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: 1,47 Tonnen
- ▶ Wohnen und Haushalt: 0,35 Tonnen
- ▶ Mobilität: 0,12 Tonnen

- ▶ Freizeit und Tourismus: 0,4 Tonnen
- ▶ Bekleidung und sonstiges: 0,20 Tonnen (davon 0,01 Tonnen für Bekleidung)

Rohmaterialien konsumiert.

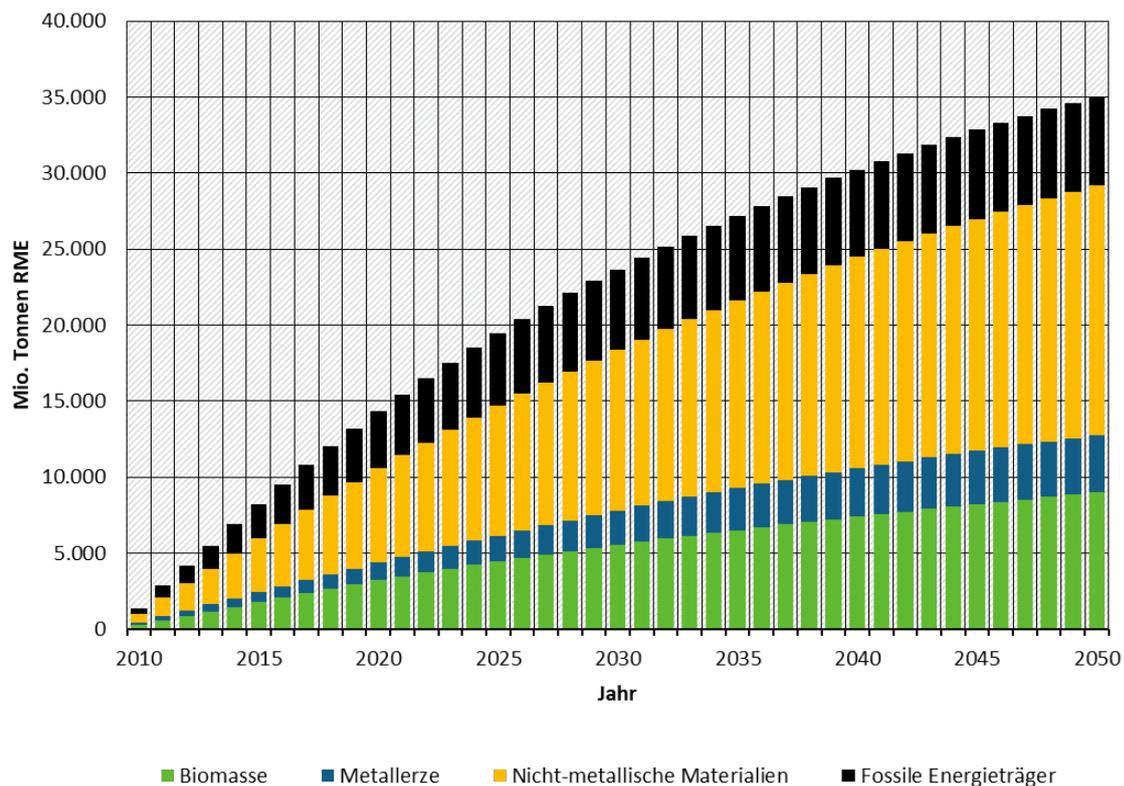
### 5.3.1.5 Der kumulierte Rohstoffkonsum

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen (LIV) auf insgesamt 35,052 Mrd. Tonnen (Abbildung 27). Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (46,9 %), gefolgt von biotischen Materialien (25,6 %) und fossilen Rohstoffen (16,8 %).

Knapp 23,7 Mrd. Tonnen werden im Zeitraum zwischen 2010 und 2030 konsumiert bzw. investiert. Zwischen 2030 und 2050 summieren sich die Primärrohstoffe auf 11,8 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 27: Kumulierter Primärrohstoffkonsum (LIV), 2010 bis 2050**



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse und Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG - URMOD

### 5.3.1.6 Substitution von Primärrohstoffen

In GreenSupreme liegt der Bedarf an Primärrohstoffen (RMC) im Jahre 2050 um insgesamt 963 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

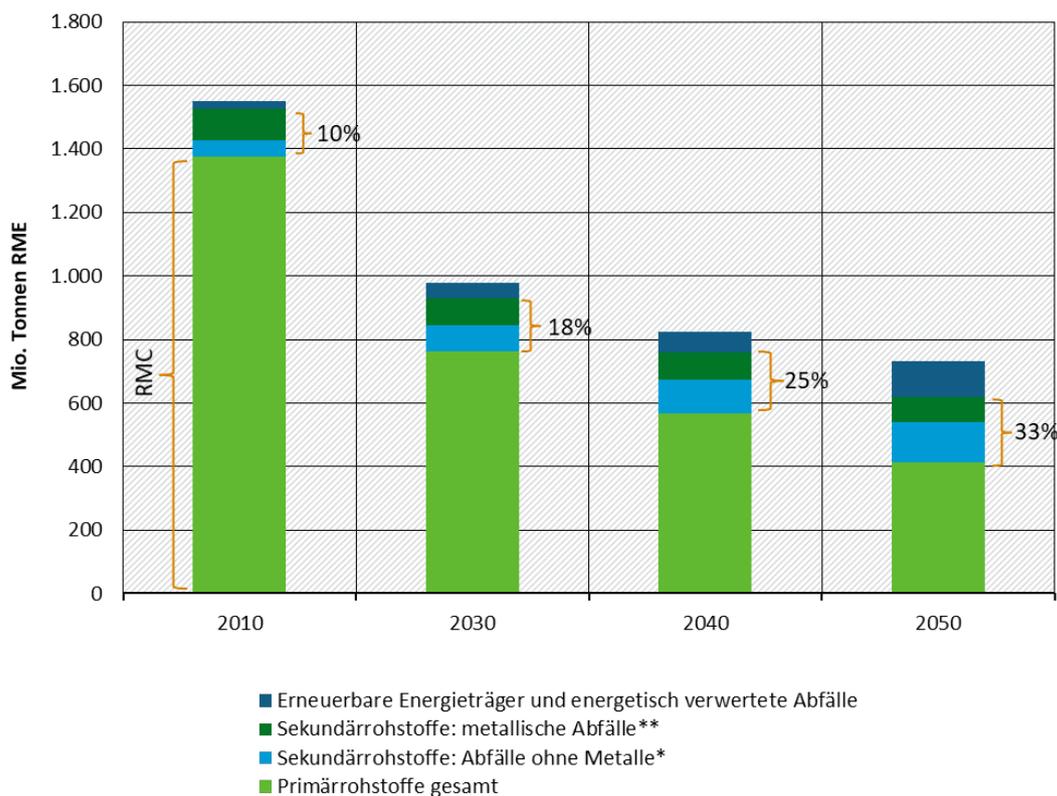
von Abfällen eingespart. Andere Primärrohstoffe werden in erheblichem Umfang durch die stoffliche Verwertung von Abfällen (Recycling) substituiert.

Aufgrund der Substitution durch Sekundärrohstoffe werden im Jahr 2050 Primärrohstoffe in Höhe von 206 Mio. Tonnen eingespart, dies sind 55 Mio. Tonnen mehr als in 2010. Diese Abschätzung ist eine Mindestabschätzung, da bei der Berechnung nicht alle stofflich verwerteten Abfälle vollständig einbezogen werden konnten. Berücksichtigt wurden die in Kapitel 4 genannten Annahmen zu Eisen, Kupfer, Aluminium, Papier, Altholz und Kunststoffe sowie Sekundärbaustoffe.

Die Substitution der fossilen Energieträger beläuft sich auf insgesamt 114,5 Mio. Tonnen Öläquivalente, das sind 90,8 Mio. Tonnen mehr als in 2010.

Abbildung 28 zeigt den Gesamtrohstoffaufwand einschließlich der Primär- und Sekundärrohstoffe sowie der substituierten fossilen Energieträger. Der Anteil der Sekundärrohstoffe (genutzte Abfälle) am Gesamtrohstoffaufwand als ein Maß für die Zirkularität der gesamten Volkswirtschaft liegt somit bei 33 % in 2050. Es soll noch einmal betont werden, dass nicht alle Sekundärrohstoffe, insbesondere nicht alle Metalle, in dieser Rechnung einbezogen werden konnten und somit der Anteil der Sekundärrohstoffe insgesamt unterschätzt ist.

**Abbildung 28: 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 nach ausgewählten Rohstoffen**

#### **5.3.2.1 Primär- und Sekundärbedarf von Eisen, Kupfer und Aluminium**

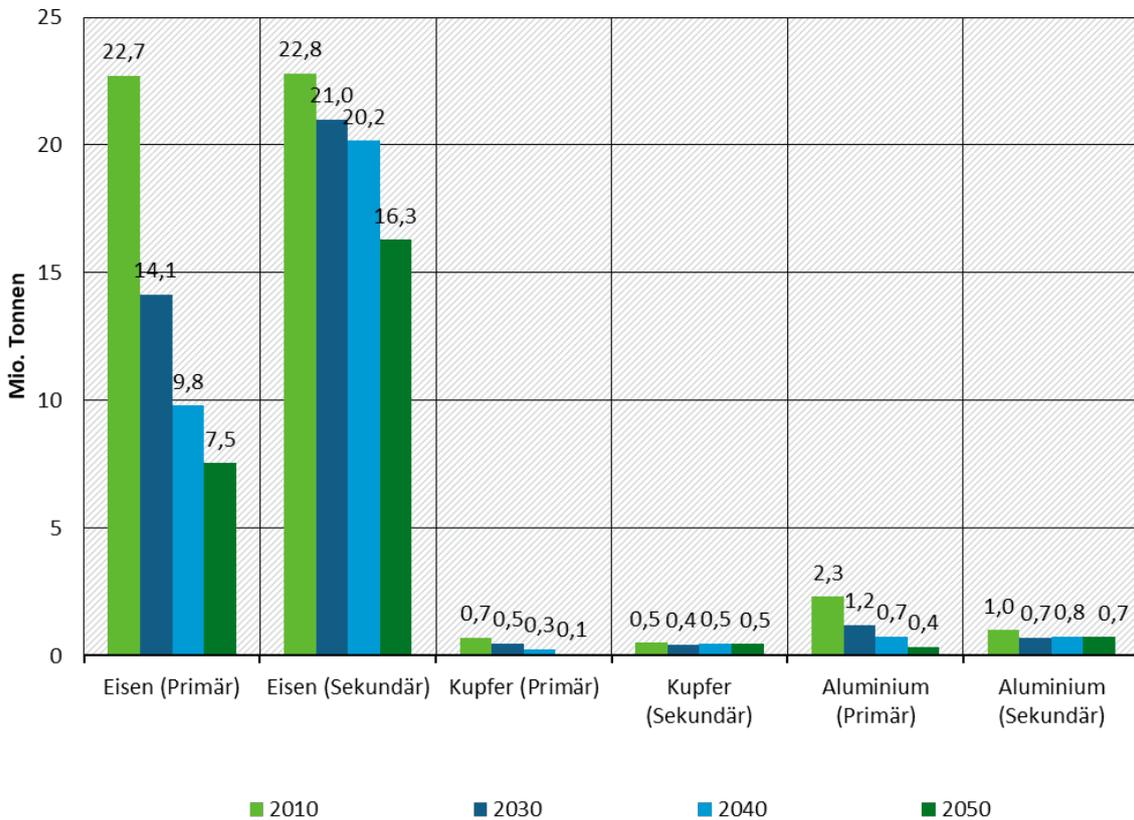
Der Bedarf (in der Abgrenzung des RMC) der primären Basismetalle ist in GreenSupreme bis 2050 rückläufig (siehe Abbildung 29). Im Gegensatz dazu steigt die anteilige Nutzung von Sekundärmetallen bezogen auf den Konsum des Metalls. In den folgenden Angaben sind die Im- und Exporte vollständig verrechnet, einschließlich der Metallanteile, die sich in Halbwaren und Endprodukten befindet. Die Metalle werden in Metallgehalten ausgedrückt (Abbildung 29).

Sowohl der Primär- als auch der Sekundäreisenkonsum ist rückläufig (zusammen -47,7 % in 2050 gegenüber 2010). Aufgrund der erhöhten Recyclingrate in 2050 im Vergleich zu 2010 verändern sich die Anteile von Primäreisen und Schrotten. Konsum einschließlich Investitionen verbrauchen in 2050 insgesamt 23,8 Mio. Tonnen Eisen, davon 7,5 Mio. Tonnen Primäreisen und 16,3 Mio. Tonnen Eisenschrott.

Auch die für Konsum und Investitionen benötigten Mengen Kupfer sind rückläufig (-55,7 % in 2050 gegenüber 2010). Aufgrund der Annahmen zu steigenden Recyclingraten bleibt im Ergebnis die nachgefragte Menge Kupferschrott mit 0,5 Mio. Tonnen konstant, der Rückgang der gesamten Nachfrage wirkt sich insbesondere auf die nachgefragte Primärkupfermenge aus, die in 2050 nur noch 0,1 Mio. Tonnen Kupfer beträgt.

Die Nachfrage nach Aluminium sinkt ebenso (-67,4 % in 2050 gegenüber 2010). Der starke Rückgang zwischen 2010 und 2030 hat verschiedene Ursachen: zum einen sinkt die Nachfrage ähnlich wie bei den Basismetallen Eisen und Kupfer. Hinzu kommen jedoch auch größere 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 stark niederschlagen. Durch die angenommenen Änderungen der Produktionsweisen in Europa und auch im Rest der Welt sinkt die Primäraluminiummenge in den Importen. Bis 2050 sinkt die nachgefragte Menge nach Primäraluminium auf 0,4 Mio. Tonnen, während aufgrund der erhöhten Recyclinganstrengungen die Menge an Aluminiumschrotten bei 0,7 Mio. Tonnen stagniert.

**Abbildung 29: Primär- und Sekundärmengen der Basismetalle in der letzten inländischen Verwendung, 2010 -bis 2050**



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

### 5.3.2.2 Primärinanspruchnahme 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 54: Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050 Tabelle 54 ausgewiesenen Mengen zeigen die Primärmetallgehalte, die im Konsum und in den Investitionen in Deutschland verbleiben (Abgrenzung des RMC bzw. der Letzten inländischen Verwendung). 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 GreenSupreme ist die Nachfrage (LIV) aus Deutschland nach allen ausgewählten Metallen kontinuierlich rückläufig (Tabelle 54). Hierbei wirkt die sinkende Nachfrage aufgrund ressourceneffizienterer Technologien und aufgrund der veränderten Nachfrage der Konsumenten zusammen.

**Tabelle 54: Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050**

Metall	Einheit	2030	2040	2050
Zink	Tsd. t Metallgehalt	306	186	70
Blei	Tsd. t Metallgehalt	96	61	14
Zinn	Tsd. t Metallgehalt	7	6	0
PGM	t Metallgehalt	20	16	12
Silber	t Metallgehalt	236	185	133
Magnesium	Tsd. t Metallgehalt	13	10	7
Chrom	Tsd. t Metallgehalt	67	55	42
Nickel	Tsd. t Metallgehalt	33	23	13

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von 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 55 ausgewiesen. Diese Rechnungen beinhalten keine Annahmen zu Recyclinganteilen, die ausgewiesenen Mengen können folglich Primär- oder Sekundärrohstoffe sein.

Die nachgefragten Mengen nach Siliziummetallen spiegeln den Aufbau der Photovoltaik wider. Die Nachfrage nach Lithium ist in 2040 im Zuge der breiten Durchdringung der Elektromobilität am höchsten. Die Nachfrage nach Graphit und Kobalt sinkt in 2040, durch die Änderungen der Batterietechnologien werden die Rohstoffe in 2050 nicht mehr gebraucht.

**Tabelle 55: Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien**

Metall	Einheit	2030	2040	2050
Siliziummetall <sup>1</sup>	t Metallgehalt	25.704	19.611	16.639
Lithium <sup>2</sup>	t Metallgehalt	2.267	12.614	9.611
Graphit <sup>2</sup>	t Metallgehalt	35.477	23.520	0
Kobalt <sup>2</sup>	t Metallgehalt	6.493	4.304	0

Quellen: <sup>1</sup>eigene Berechnungen, <sup>2</sup>ifeu/IEE/SSG-TREMOMOD-Materials

### 5.3.2.3 Der Einsatz von Holz

Holz wird gegenwärtig sowohl stofflich als auch energetisch genutzt. In GreenSupreme sinkt der Bedarf an (Primär-) Holz zwischen 2010 und 2050 [2030/2040] um -63,4 % [-38,2 %/-52,3 %] auf rund 12,1 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 weder im In- noch im Ausland für energetische Zwecke genutzt, dies reduziert die Primärholzmenge signifikant. Weiterhin steigt die effiziente Verwendung von Papier und Pappe, auch dies senkt die nachgefragte Menge nach Holz. Zusätzlich tragen auch die

Konsumänderungen, insbesondere die geringere Nachfrage nach Möbeln und Papierwaren und Verpackungen, zu einer Senkung der Nachfrage bei. Demgegenüber steht die steigende Nachfrage nach Holz aus dem Bausektor, insbesondere durch die Ausweitung der Holzbauweise. Allerdings sinkt die Bautätigkeit im Zeitverlauf, so dass sich die Rückgänge aufgrund der eingangs beschriebenen Trends stärker auf das Ergebnis auswirken als die steigende Nachfrage aus dem Bausektor.

Im Vergleich zu GreenEe2 liegt die Nachfrage nach Holz in GreenSupreme in den Jahren 2030 bzw. 2040 um 14,1 % bzw. 6,1 % höher und in 2050 um 9,4 % niedriger.

#### **5.3.2.4 Die Nutzung von Sand, Kies und Schotter**

Sand und Kies und Schotter werden 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 gegenwärtig auf den Bedarf dieser Rohstoffe zurück. Gleichzeitig ist die konkrete Mengenangabe mit Unsicherheiten behaftet, da die empirischen Daten nicht ausreichend erfasst werden.

Im GreenSupreme-Szenario sinkt der Bedarf bis 2050 auf 170 Mio. Tonnen, dies ist ein Rückgang um 61,9 % gegenüber 2010. Der Rückgang verläuft relativ stetig mit 32,8 % bis 2030 und 48,3 % 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, und der zunehmend effizientere Einsatz der Rohstoffe. Im Vergleich zu GreenEe2 werden 25,7 % weniger Sand, Kies und Schotter in 2050 gebraucht.

#### **5.3.2.5 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 Szenario-Annahmen zu erhalten. Eine Prognose – was RESCUE nicht ist – würde wahrscheinliche Entwicklungen z.B. bezüglich Technologieänderungen oder Reaktionen des Marktes einbeziehen.

Abbildung 30 zeigt den Vergleich der von Deutschland im Zuge der Transformation in GreenSupreme ermittelten nachgefragten Mengen als Anteil an der globalen Produktion in 2018.

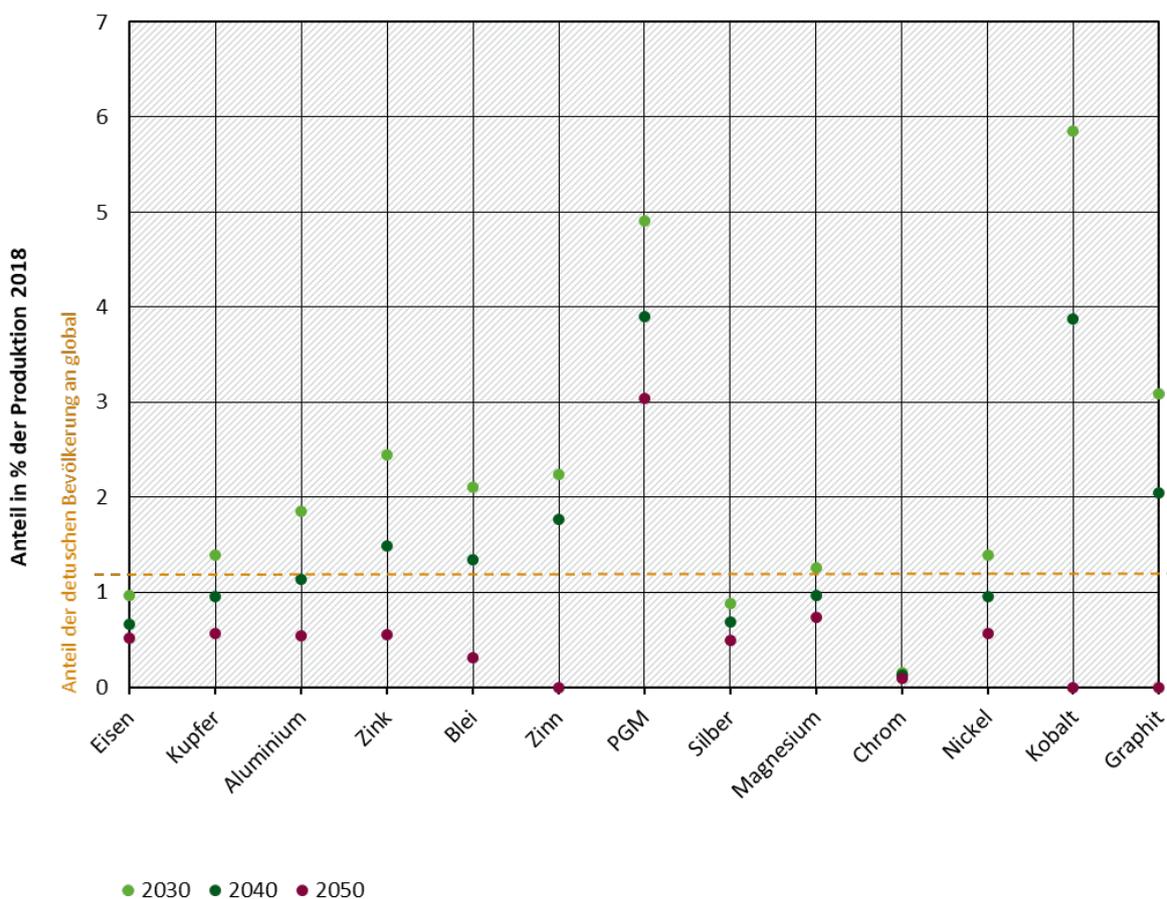
Der Anteil der deutschen Bevölkerung an der globalen Bevölkerung kann als Referenz zur Einordnung der Nachfragemenge dienen.

Die von Deutschland nachgefragten Mengen nach Eisen, Chrom und Silber liegen in allen Jahren unter der Referenz. Das heißt, wenn die globale Nachfrage pro Person etwa so groß ist wie die deutsche Nachfrage und die Produktionskapazitäten konstant bleiben, ist keine Knappheit zu erwarten.

Nur in 2030 liegt die Nachfrage von Kupfer, Aluminium, Nickel und Magnesium über der Referenz. In 2030 und 2040, aber nicht mehr in 2050, liegt die Nachfrage nach Zink, Blei, Zinn, Kobalt und Graphit über der Referenzlinie. Deutschland fragt somit einen überproportionalen Anteil nach diesen Rohstoffen im Pfad nach.

Im Gegensatz dazu fragt Deutschland einen überproportionalen Anteil nach Lithium und PGM in allen Jahren nach. Die Nachfrage nach Lithium liegt in 2030 – 2040 – 2050 bei 8 – 45 – 34 % der Produktionsmenge von 2018 und ist in der Abbildung nicht abgebildet. Es sei darauf verwiesen, dass die nachgefragten Lithium-, Graphit-, Siliziummetall- und Graphitmengen ohne Sekundäranteile berechnet wurden. Die Entwicklung und Errichtung von Recyclingsystemen würde die Nachfrage nach den Primärrohstoffen signifikant senken.

**Abbildung 30: Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018**

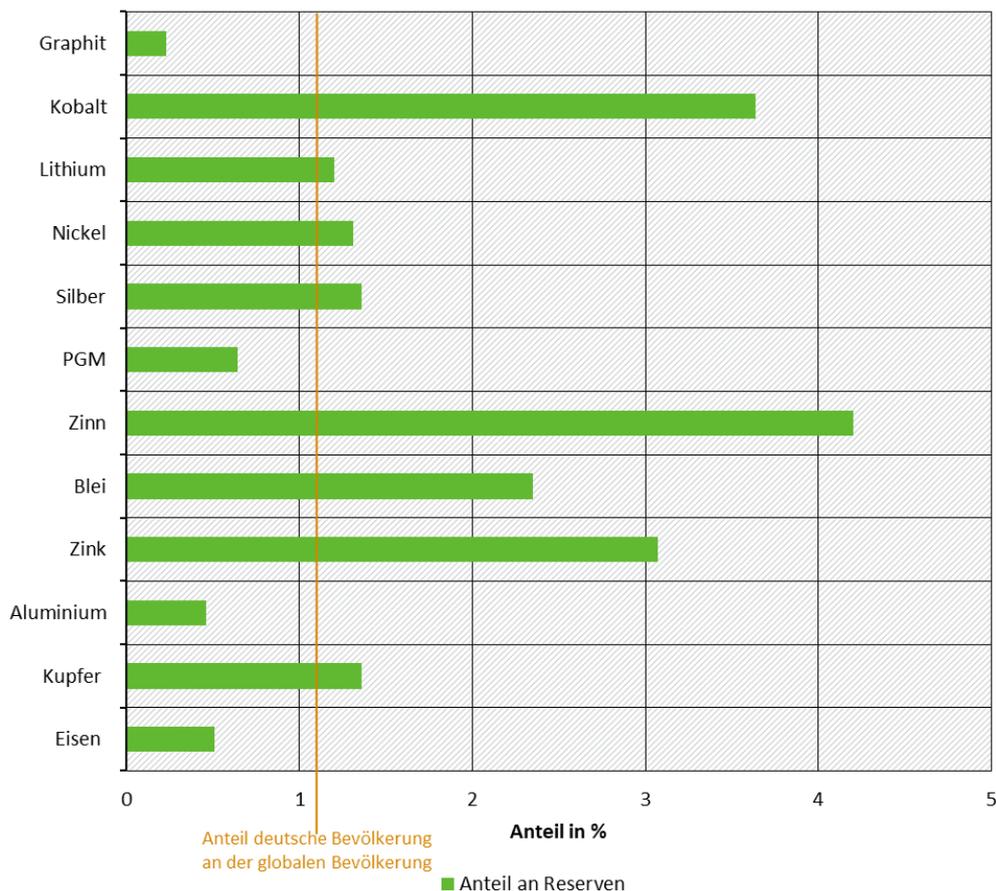


Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG – URMOD und (USGS 2020); zu beachten: im Unterschied zur RESCUE-Studie (UBA 2019a) wurden die Daten von USGS noch einmal aktualisiert.

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. 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, folglich kein Versorgungsengpass zu erwarten.

Für Eisen, Aluminium, PGM und Graphit ist keine Knappheit unter den Szenario-Annahmen zu erwarten, sofern die Produktionskapazitäten ausgeweitet werden können und die globale Nachfrage pro Person der Nachfrage in Deutschland entspricht (Abbildung 31). Für Kupfer, Nickel, Silber, Zinn, Blei, Kobalt, Lithium und Zink sind jedoch Versorgungsengpässe unter den genannten Bedingungen zu erwarten. Mögliche Versorgungsengpässe können umgangen werden, wenn die Nachfrage gesenkt wird, beispielsweise, wenn andere Technologien oder Substitute (einschließlich Sekundärrohstoffe) genutzt werden, oder wenn das Angebot aufgrund des Einsatzes von besseren Technologien erhöht werden kann.

**Abbildung 31: Kumulierte Nachfrage 2018 - 2050 ausgewählter Rohstoffe als Anteil der Reserven in 2018**



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

Die kumuliert nachgefragten Mengen können schließlich mit den Ressourcen, also den Mengen, die in der Erdkruste vorkommen, aber gegenwärtig nicht wirtschaftlich/technologisch abbaubar sind, mit den kumuliert nachgefragten Mengen in Deutschland verglichen werden. Es zeigt sich, dass die kumuliert nachgefragte Menge bei keinem der untersuchten Rohstoffe über 1,1 % der (bekannten) Ressourcen liegt.

Im GreenSupreme-Szenario wurde angenommen, dass im Rest der Welt in 2050 ebenso hohe Sekundäranteile in der Metallproduktion nachgefragt und verarbeitet werden wie in Deutschland zehn Jahre zuvor. Da in vielen Ländern Infrastrukturen noch nicht bestehen, ist davon auszugehen, dass in diesen Ländern sogar eine höhere Nachfrage als in Deutschland nach den Basismetallen Eisen, Kupfer und Aluminium und vielen weiteren Metallen im Transformationspfad entsteht (vgl. z.B. auch OECD 2019; Pauliuk et al. 2013; Schipper et al. 2018). Die Nachfrage betrifft die Sekundärmetalle ebenso wie die oben bereits diskutierten Primärmetalle. Angesichts der in GreenSupreme berechneten zukünftigen Schrottmengen sind Versorgungsengpässe bei Metallschrotten absehbar, sofern nicht Sammelmengen und Aufbereitungskapazitäten signifikant erhöht werden.

Eine Umweltwirkungsabschätzung der Transformationspfade über die Treibhausgasemissionen hinaus überstieg die Möglichkeiten im Projekt RESCUE, wird jedoch in Folgeprojekten untersucht. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass Abbau und Verarbeitung von Rohstoffen ebenso wie Nutzung, Recycling und / oder Deponierung mit teilweise erheblichen Umweltbelastungen einhergehen. So hat insbesondere das Projekt „ÖkoRess“ die Umweltgefährdungspotenziale beim Abbau und den ersten Verarbeitungsschritten für insgesamt 50 abiotische (mineralische, einschl. metallische) Rohstoffe systematisiert (Dehoust et al. 2017). Ein wichtiges Ergebnis ist, dass der Abbau aller untersuchten Rohstoffe mit großen oder sogar sehr großen Umweltgefährdungspotenzialen verbunden ist. Zwar variieren die Umweltgefährdungspotenziale je nach Lagerstätte, geologischer Zusammensetzung der Minen, Aufbereitung der Erze und geographischer Lage der Lagerstätte. Wenn allerdings ein großer Anteil der gegenwärtig bekannten Reserven oder sogar darüber hinaus weitere Ressourcen erschlossen werden müssten, wird dies zwangsläufig mit sehr hohen Umweltbelastungen verbunden sein.

### 5.3.3 Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe2

Die Transformation in GreenSupreme, das heißt die Kombination aus sehr ambitionierten technischen und sehr ambitionierten Lebensstiländerungen, führt im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 [2030/2040] liegt der RMC 21,8 % [18,5 % / 16,3 %] niedriger als in GreenEe (Tabelle 56). Der Unterschied ist bei allen abiotischen Rohstoffen, und dabei insbesondere bei den fossilen Rohstoffen, stark ausgeprägt. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 ebenso um 21,8 % niedriger als in GreenEe.

**Tabelle 56: Der Rohstoffkonsum (RMC) in GreenSupreme und GreenEe im Vergleich in Tsd. Tonnen RME**

	GreenSupreme			GreenEe2			GreenSupreme ggü. GreenEe in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
RMC gesamt	763.137	568.110	411.041	912.252	697.144	525.710	-16,3	-18,5	-21,8
Biomasse	203.282	169.677	149.916	210.550	181.618	159.198	-3,5	-6,6	-5,8
Metallerze	114.990	75.509	42.528	137.963	100.696	71.014	-16,7	-25,0	-40,1
Nicht-metallische Minerale	378.515	294.989	218.598	450.523	372.518	288.894	-16,0	-20,8	-24,3

	GreenSupreme			GreenEe2			GreenSupreme ggü. GreenEe in %		
Fossile Rohstoffe	66.350	27.935	0	113.216	42.312	6.604	-41,4	-34,0	-100,0

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - URMOD

## 5.4 Flächenentwicklung

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

Auch wenn die Siedlungsneuanspruchnahme stärker als in den anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme GreenLife, rückläufig ist und infolge dessen die Flächenneuversiegelung sinkt, so steigt doch die Fläche für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie für Verkehrs- und Erholungsflächen weiter an. Im Gegensatz dazu sinkt die Betriebsfläche aufgrund der rückläufigen Rohstoffextraktion in Deutschland stärker als in allen anderen Green-Szenarien, so dass insgesamt am wenigsten Fläche für Siedlung und Verkehr benötigt wird. Insgesamt steigt die Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 52.488 km<sup>2</sup> an, dies entspricht knapp 14,7 % der gesamten Bodenfläche Deutschlands (Tabelle 57).

Die Acker- und Grünlandfläche sinkt aufgrund der Umwandlung in Siedlungsflächen und durch die Wiedervernässung organischer Böden auf insgesamt 148.865 km<sup>2</sup>. Die Waldfläche wurde von den WEHAM-Szenarien (Naturschutzpräferenzszenario) übernommen. In Folge der Annahmen zur Rückvernässung steigen wiedervernässte Flächen auf 10.889 km<sup>2</sup> an. Vegetationsflächen nehmen somit 83 % der Gesamtfläche in 2050 ein.

Die Flächenbelegung durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (Freiflächen-PV und WEA-on-shore) liegt in 2050 bei insgesamt 556 km<sup>2</sup>. Diese Fläche beinhaltet die versiegelten und überschirm-ten Flächen sowie Zwischenflächen und Flächen für den Kranstellplatz und Zuwegung und ist damit nicht identisch mit der Flächenangabe zu den EE-Potenzialen. Die Flächenbelegung entspricht 0,16 % der Gesamtfläche Deutschlands.

**Tabelle 57: Flächennutzung in Deutschland, 2010, 2030, 2040 und 2050**

	2010 <sup>1</sup>	2030 <sup>2</sup>	2040 <sup>2</sup>	2050 <sup>2</sup>	
Bodenfläche TOTAL [km <sup>2</sup> ]	357.127	357.582*	357.582	357.582	Destatis, Fortschreibung 2017
SIEDLUNG und Verkehrsfläche	51.291	52.456	52.543	52.488	Eigene Berechnung
Wohnbau, Industrie/Gewerbe, Erholung, sonst. Siedlungsflächen	30.901	32.029	32.197	32.249	Eigene Berechnung
Betriebsfläche	2.459	1.953	1.775	1.638	Eigene Berechnung auf der Basis von URMOD
Verkehr	17.931	18.473	18.570	18.600	Eigene Berechnung
VEGETATION	297.279	296.782	296.718	296.766	(Abgrenzung Destatis) einschl. UNLAND
Landwirtschaft	162.080	153.913	151.168	150.556	ALMOD
davon Acker	115.140	112.723	111.515	111.515	ALMOD

	2010 <sup>1</sup>	2030 <sup>2</sup>	2040 <sup>2</sup>	2050 <sup>2</sup>	
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	36.678	39.299	39.851	Eigene Berechnung (Differenz)
davon Moor und Sumpf (Destatis)	929	1.186	1.186	1.186	Destatis, Wert von 2017 fortgeschrieben
davon wiedervernässte Flächen (ab 2030)		5.766	9.968	10.889	Annahme LULUCF
Bergbaufolgeflechte		655	833	970	Eigene Berechnung auf der Basis von URMOD
GEWÄSSER	8.557	8.215	8.215	8.215	Wert von Destatis 2017 fortgeschrieben
Nachrichtlich: Fläche für EE	121	388	488	556	
Fläche für PV-Freifläche	89	337	425	492	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)
Fläche für WEA - onshore	32	51	64	64	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)

Quellen: <sup>1</sup>(Destatis 2018b), <sup>2</sup>Quellen: siehe rechte Spalte

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

GreenSupreme beschreibt im Vergleich zu allen anderen Szenarien den ambitioniertesten Transformationspfad. GreenSupreme kombiniert einen ambitionierten gesellschaftlichen Wandel und ambitionierte technologische Änderungen. Die zusätzlichen Konsumänderungen betreffen die Reduktion von Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs und die stärkere Nachfrage nach regionalen Nahrungsmitteln sowie die Nachfrage nach verschiedenen nachhaltigeren Konsumgütern. Die Konsumänderungen betreffen aber auch Änderungen im Mobilitätsverhalten und von Wohngewohnheiten. Sharing-Konzepte, langlebige Güter und Reparatur finden im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien stärker Verbreitung. Die technologischen Änderungen umfassen die Umstellung des Energiesystems, die Produktionsweise der Basisindustrien und die Erhöhung von Ressourceneffizienzanstrengungen einschließlich Recycling, Leichtbauweisen und Substitutionen.

Im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate sind keine Produktionsmengen von Basisindustrien festgelegt und es finden keine zunehmenden Exporte von Überschussproduktionen statt. Die Produktionsmengen werden in Deutschland der inländischen Nachfrage folgend verändert.

Im GreenSupreme-Szenario sinken die **Treibhausgasemissionen** – gerechnet nach NIR – auf 42,915 Mio. t CO<sub>2Äq</sub> in 2050 und gehen damit um 96,7 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück (Abbildung 16). Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 70 % [88,4 %]. Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (-84,6 %). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 „nur“ um 49 % 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 93,4 %, 85,6 % und 89,6 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 70 %. In 2050 ist unter Einbeziehung natürlicher Senken Treibhausgasneutralität, also maximal Netto Null-THG-Emissionen, sicher erreichbar.

In der **Industrie** werden bis 2050 alle energiebedingten Treibhausgasemissionen vollständig vermieden. Zur Reduktion der prozessbedingten Treibhausgasemissionen tragen Umstellungen auf emissionsarme bzw. emissionsfreie Prozesse bei. Mit Blick auf die absoluten Einsparungen sind die Umstellung der Prozesse in der Stahl- und Zementindustrie hervorzuheben, auch wenn in 2050 noch immer nicht alle THG-Emissionen vermieden werden können.

In der **Landwirtschaft** tragen insbesondere die Lebensstiländerungen zu dem Rückgang bei. So gehen infolge der veränderten Nachfrage nach weniger tierischen und dafür mehr pflanzlichen Nahrungsmitteln die größten Rückgänge der Treibhausgasemissionen auf die Tierhaltung aufgrund des geringeren Viehbestands zurück (-26,3 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>).

Auch die THG-Emissionen aufgrund von Landnutzung und Landnutzungsänderungen (**LULUCF ohne Wald**) sinken. Wichtige Faktoren sind die Wiedervernässung von Mooren, die Reduktion der Siedlungsentwicklung und der Stopp des Torfabbaus.

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen auch weltweit rückläufige Treibhausgasemissionen. Diese liegen – gerechnet gemäß dem UGR-Konzept - in 2050 [2030/2040] nur noch bei 33 [392/160] Mio. t CO<sub>2Äq</sub>, was einem Rückgang von 96,6 % 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, die annahmegemäß null betragen.

Im GreenSupreme-Szenario entstehen die geringsten Treibhausgasemissionen im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 20,5 % [24,8 %/41,7 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als beispielsweise in GreenEe1. Die Reduktion der Produktionsmengen auf die Treibhausgasreduktion ist ein Faktor, der insbesondere auf die Reduktion der THG-Emissionen in den Quellgruppen Industrie, Energie und Verkehr Auswirkungen hat. Auf die zusätzlichen Änderungen der ressourceneffizienten Technologien und Lebensstile gehen in 2030/2040 und 2050 Reduktionen von 21,9/38,1 bzw. 3,6 % der Treibhausgasemissionen insbesondere in den Quellgruppen Landwirtschaft und Abfall zurück. Bereinigt um den Einfluss des internationalen Handels sind die technologischen Änderungen und die Änderung der Lebensstile vor allem im Verkehr 2040 signifikant mit -54,4 % gegenüber GreenEe2.

In keinem anderen Green-Szenario liegen die kumulierten Treibhausgas-Emissionen so niedrig wie in GreenSupreme. Dies gilt insbesondere auch für den Pfad. So liegen bereits in 2030 die kumulierten THG-Emissionen in GreenSupreme 0,96 bzw. 0,85 Milliarden Tonnen CO<sub>2Äq</sub> unter den THG-Emissionen in GreenEe1 bzw. GreenEe2 (-2,5 % bzw. -2,2 %).

An dieser Stelle sollen die wesentlichen, „großen“ Stellschrauben für den Rückgang der THG-Emissionen noch einmal hervorgehoben werden:

- ▶ Die Transformation des Energiesystems und dabei insbesondere die schnelle Umstellung auf erneuerbare Energien über alle Sektoren hinweg mit dem schnellen Kohleausstieg sowie einer intelligenten Kopplung der Sektoren
- ▶ Die Reduktion des Energiebedarfs und der Nachfrage nach einer Vielzahl von Gütern und Dienstleistungen
- ▶ Die Umstellung emissionsintensiver Industrieprozesse auf emissionsärmere bzw. emissionsfreie Verfahren, oftmals einhergehend mit der stärkeren Nutzung von Sekundärrohstoffen
- ▶ Die Reduktion der Produktionsmengen, insbesondere von emissionsintensiven Halbwaren und Produkten in Folge des Rückgangs der inländischen Nachfrage, der Substitution durch emissionsfreie Produkte und der ressourceneffizienteren Nutzung der Halbwaren und Produkte
- ▶ Die Umstellung der Ernährungsweise, einschließlich der Reduktion tierischer Anteile in der Ernährung und der Vermeidung von Abfällen

Gleichzeitig tragen sehr viele, teilweise auch recht kleinteilige Änderungen zum Rückgang der Treibhausgasemissionen bei. Diese „kleinen“ Änderungen werden umso sichtbarer, wenn die „großen“ Hebel bereits berücksichtigt wurden.

Es ergeben sich im **Energiebereich** – sowohl aus der Kombination der Szenarien GreenLife und GreenMe sowie weiteren Annahmen zur Erhöhung der THG-Einsparung:

- ▶ Geringerer Gebäudewärmebedarf aufgrund geringerer Wohnfläche, hoher Energieeffizienz und höherem Anteil von Mehrfamilienhäusern. Vollständige Versorgung durch EE-Technologien und dabei ein hoher Anteil von Fernwärme und damit geringerer Anteil von Wärmepumpen.

- ▶ Deutlich geringeres Verkehrsaufkommen durch eine deutliche Stärkung der aktiven Mobilität (Rad- und Fußverkehr), eine zunehmende gemeinschaftliche Nutzung von Pkw (Ridesharing) im urbanen Raum und eine deutliche Reduktion von Flugreisen.
- ▶ Geringerer Energieverbrauch in der Industrie aufgrund Effizienzsteigerungen, Umstellung von Prozessen und noch stärkerer Kreislaufwirtschaft u.a.
- ▶ Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Einsparung im Pfad durch sehr schnellen und hohen Markthochlauf von Wind- und PV-Anlagen, Wärmepumpen, Elektromobilität, PtG/L-Importe, Industrietransformation und durch einen frühzeitigen Kohleausstieg.
- ▶ Verminderung des Anteils von PV gegenüber Wind-Onshore.

Im GreenSupreme-Szenario sinkt der Endenergiebedarf in 2050 auf 1.366 TWh. Den größten Anteil von 661 TWh verbraucht die Industrie (48,4 %), 286 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (19,1 %), GHD (17 %) und – was beachtlich ist – an letzter Stelle dem Verkehr (15,5 %). Die nationale Nettostromerzeugung steigt kontinuierlich auf insgesamt 740,7 TWh in 2050 und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien produziert. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Techniken im Transformationspfad und in 2050. Insbesondere Onshore kann frühzeitig hohe Anteile zur Stromerzeugung beitragen, dass bereits im Jahr 2040 eine nationale PtG-Erzeugung möglich ist, weil die Potenziale für eine direkte Stromnutzung ausgeschöpft sind. In 2050 liegt die installierte Leistung in Deutschland bei 127,4 GW Windkraftanlagen onshore (die aber bereits schon 2040 erreicht wird), 30,3 GW Windkraftanlagen offshore (2040 27,4 GW) sowie 130,5 GW Photovoltaikanlagen (2040 119,1 GW).

Aus dem Vergleich mit den GreenEe-Szenarien wird deutlich, dass mittelfristig einen schnellen Anstieg aber langfristig eine deutlich geringere nationale Stromerzeugung notwendig wird (langfristig -51 TWh gegenüber GreenEe1 bzw. -47 TWh gegenüber GreenEe2). Die durch den Kohleausstieg 2030 wegfallende Stromerzeugung führt dabei nur zu einer moderaten Mehrerzeugung von Gaskraftwerken. Vor allem wird dies durch deutlich mehr Wind- und PV-Stromerzeugung kompensiert und auch noch der Mehrstromverbrauch in 2030 gedeckt. Der Vergleich des Stromverbrauchs zeigt, dass der höhere mittelfristige Stromverbrauch insbesondere auf den früheren Wasserstoffstromverbrauch aus der Industrie zurückzuführen ist. Der Stromverbrauch von Elektromobilität und Wärmepumpen ist dagegen mittelfristig nur moderat höher, da die höhere Durchdringung der Techniken hier noch die Verbrauchseinsparung überwiegt. Durch den höheren Ausbau erneuerbarer Energien ist zudem in 2040 mehr „überschüssiger Strom“ für PtH-Anwendungen verfügbar, und 2040 kann auch schon in Deutschland PtG hergestellt werden. Langfristig ist dagegen der Stromverbrauch in vielen Anwendungen geringer als in den anderen Szenarien.

Im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien ist der langfristige Brennstoffbedarf deutlich geringer (in 2050 -115 TWh in GreenEe1 bzw. -98 TWh in GreenEe2). Es zeigen sich langfristig deutliche Einsparung durch die Lebensstiländerung, Null-Wachstum und gesteigerter Effizienz. In GreenSupreme wird weniger Strom in den Anwendungsbereichen benötigt, so dass auch noch national kostengünstigen Erzeugungspotenziale genutzt werden können, um mehr nationales PtG/L als in den anderen Green-Szenarien zu erzeugen. Dennoch tritt hier eine Sättigung durch die höhere PV-Kosten (mehr Dachflächen) ein, da die PtG/L-Erzeugungsmenge gegenüber GreenEe2 trotz geringerem Gesamtstromverbrauch nicht weiter gesteigert werden konnte. Aufgrund des geringeren Brennstoffverbrauchs ist das Verhältnis zwischen PtG/L-Importen zu

nationaler PtG/L-Erzeugung langfristig deutlich weniger importabhängig als in GreenEe1. Der Anteil der Importe am Gesamtverbrauch liegt mit 77,6 % aber auch niedriger als in GreenEe2 mit 81 %.

Im **Gebäude**wärmebereich steigt die bewohnte Pro-Kopf Wohnfläche wie in den anderen Green-Szenarien bis zum Jahr 2030 weiter an, liegt 2030 jedoch mit 46 m<sup>2</sup>/Kopf auf einem niedrigeren Niveau und sinkt im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenLife) anschließend bis 2050 auf 41 m<sup>2</sup>/Kopf. Die resultierende Gesamtwohnfläche ist deutlich rückläufig ist und liegt in 2050 bei knapp 3 Mrd. m<sup>2</sup> bzw. rund 15 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Der Endenergieverbrauch für Raumwärme von Wohngebäuden liegt um 20 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Hauptsächlich zurückzuführen ist dieses auf die niedrige Wohnfläche und den niedrigeren Anteil der Flächen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH) gegenüber dem Anteil der Flächen in Mehrfamilienhäusern (MFH). Da die Unterschiede im Nichtwohngebäudebereich gering sind, ist der Endenergiebedarf in Summe für alle Gebäude um 15 % geringer als in den GreenEe-Szenarien. Durch den höheren Mehrfamilienhausanteil und die Verstädterung steigt auch der Anteil von Fernwärme von 20 % auf 24 %. Der Rest der Gebäude wird mit Wärmepumpen versorgt, wobei hier der Markthochlauf möglichst schnell stattfindet.

Im **Verkehrs**sektor liegt der Endenergieverbrauch in 2050 bei insgesamt 208 TWh, 156 TWh entfallen auf den nationalen Verkehr und 52 TWh auf den internationalen Verkehr. Aufgrund der sehr starken Rückgänge durch eine Maximierung von Verkehrsverlagerung/Vermeidung und Elektrifizierung liegen die Verbräuche im motorisierten Individualverkehr (67 TWh in 2050 ggü. 384 TWh in 2010), schon nahe am Straßengüterverkehr (57 TWh ggü. 193 TWh in 2010) gefolgt vom internationalen Flugverkehr, der mit 42 TWh in 2050 ggü. 87 TWh in 2010 ohne die Option der Elektrifizierung einen sehr starken Rückgang aufweist. Es zeigt sich, dass in GreenSupreme der nationale Verkehr im Jahr 2030 zwar nur 10 % weniger Endenergie benötigt als GreenEe2, aber bis 2050 diese Endenergieeinsparung auf 25 % steigt. Auch im internationalen Verkehr führen die die Maßnahmen zu Endenergieeinsparungen um 11 % (2030) bis 43 % (2050) in GreenEe2. Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenSupreme etwa 13 % weniger Kraftstoffe benötigt als in GreenEe2. Im Jahr 2050 werden in GreenSupreme 10 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 43 % (national bzw. Summe national und international) geringer als in GreenEe2.

Die Transformation in GreenSupreme führt zu einer Reduktion des **Rohstoffkonsums** (RMC) um 70,1 % gegenüber 2010 auf insgesamt 411,0 Mio. Tonnen Rohmaterialäquivalente. Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die um 100 % zurückgehen, da weder im In- noch im Ausland fossile Energieträger genutzt werden. Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (82,8 %). Der RMC für nicht-metallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 61 %. Der RMC sinkt bei den Metallerzen bis 2050 um 73,8 %) und bei der Biomasse um 43,5 %. Der Rückgang des RMC verläuft bei den fossilen Rohstoffen zwischen 2010 und 2030 sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

Die Gesamtrohstoffproduktivität (Letzte Verwendung / RMI) liegt zwischen 2030 und 2040 bzw. 2040 bis 2050 bei 2,1 % bzw. 3,1 % im Jahresdurchschnitt. Sie liegt um 379 Indexpunkte höher im Vergleich zum Jahr 1994.

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen sinkt auf 5,72 Tonnen pro Person in 2050, was einem Rückgang um 66 % im Vergleich zu 2010 entspricht.

Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte sinkt auf 182 Mio. Tonnen RME in 2050. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist in 2050 das rohstoffintensivste mit 106 Mio. Tonnen RME, gefolgt

vom Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus (28 Mio. t RME) und Wohnen und Haushalt (25 Mio. t RME).

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen auf insgesamt 35,052 Mrd. Tonnen RME. Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (46,9 %), gefolgt von biotischen Materialien (25,6 %) und fossilen Rohstoffen (16,8 %).

Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 206 Mio. Tonnen Primärrohstoffe in 2050 eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 33 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 führt die Transformation in GreenSupreme zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 21,8 % niedriger als in GreenEe2. Der Unterschied ist bei allen abiotischen Rohstoffen, und dabei insbesondere bei den fossilen Rohstoffen, stark ausgeprägt. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 ebenso um 21,8 % niedriger als bei GreenEe.

In GreenSupreme werden alle untersuchten Metalle sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer geringeren Menge als in GreenEe nachgefragt. In Folge sind insgesamt weniger Versorgungsengpässe zu erwarten. Im Pfad und in 2050 sind nur bei PGM und Lithium Versorgungsengpässe zu erwarten, sofern die global durchschnittliche Pro-Kopf-Nachfrage nach diesen Metallen der deutschen Nachfrage entspricht und die Produktionsmengen nicht erhöht werden. In 2030 und/oder 2040, aber nicht mehr in 2050, liegt die Nachfrage nach Kupfer, Aluminium, Magnesium, Nickel, Graphit, Kobalt, Zink, Blei und Zinn über der Referenzlinie, das heißt Deutschland fragt einen überproportionalen Anteil gemessen am Anteil der Bevölkerung an der globalen Bevölkerung nach diesen Rohstoffen im Pfad nach. Bei diesen Rohstoffen kann es unter den Szenario-Annahmen, konstanten Fördermengen und global gleicher Nachfrage pro Person zu temporären Versorgungsengpässen kommen. Das Ausmaß der potenziellen Versorgungsengpässe ist deutlich geringer als in den anderen Green-Szenarien, insbesondere im Vergleich zu GreenLate.

Die wesentlichen Faktoren für den Rückgang der Rohstoffnachfrage seien abschließend zusammengefasst:

- ▶ Die Substitution der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Energien bzw. synthetische Rohstoffe
- ▶ Die Substitution von Primärrohstoffen durch biotische Rohstoffe, durch leichtere Rohstoffe und/ oder durch Sekundärrohstoffe
- ▶ Die Steigerung der Materialeffizienz in Industrien und Dienstleistungen
- ▶ Die Nutzung rohstoffsparender Technologien und die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten

Die Reduktion der Nachfrage nach einer Vielzahl von Gütern und Dienstleistungen, ausgehend von einer geänderten Konsumentennachfrage; rohstofflich relevant ist der Rückgang der Wohnraumnachfrage und in Verbindung damit die rückläufige neue (zu erschließende) Siedlungsfläche und auch die Nachfrage nach privaten PKWs. Die Wachstumsbefreiung, die im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien angenommen wurde, wirkt insbesondere Rebound-Effekten entgegen.

GreenSupreme ist das Szenario, das die geringsten kumulierten Treibhausgasemissionen aufweist. Es zeigt, dass ambitionierte Änderungen in allen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft einschließlich Politik erforderlich sind und zusammenwirken müssen, um die Treibhausgasemissionen schnell und stark zu mindern und in Folge den Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bremsen und limitieren zu können.

## Quellenverzeichnis

- BDL-Klimaschutz-Portal (2019): Nachhaltiger Luftverkehr durch klimaoptimierte Flugrouten. <https://www.klimaschutz-portal.aero/klimaneutral-fliegen/klimaoptimierte-flugrouten/>. (15.10.2019).
- 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](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](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf) (28.07.2020).
- 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).
- Bürgerdialog Stromnetz (2017): Factsheet Erdkabel und Freileitung.
- Daly, H. E. (1996): Beyond growth: the economics of sustainable development. Beacon Press.
- DBU (2016): Neuartige hüttensandhaltige Zemente senken Kohlendioxid-Emissionen. DBU aktuell Nr. 4 /2016.
- Dehoust, G.; Manhart, A.; Möck, A.; Kießling, L.; Vogt, R.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Auberger, A.; Priester, Dr. M.; Rechlin, Dr. A.; Dolega, P. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRes I) Konzeptband.
- 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 Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden.
- 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.
- Destatis (2020): Bevölkerung Deutschland; 2010, GENESIS.
- Deutsche Energie-Agentur DENA (2012): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030.
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2019): Klimaauswirkungen von Wolken aus Flugzeugkondensstreifen können sich bis 2050 verdreifachen. [https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/02/20190627\\_klimaauswirkung-von-wolken-aus-flugzeugkondensstreifen.html](https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/02/20190627_klimaauswirkung-von-wolken-aus-flugzeugkondensstreifen.html). (15.10.2019).
- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020a): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. UBA Climate Change 01/2020.
- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife. UBA Climate Change 04/2020.
- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020c): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe. UBA Climate Change 03/2020.

- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020d): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020.
- Frondel, 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.
- Göpel, M. (2020): Unsere Welt neu denken: Eine Einladung. Ullstein Ebooks.
- Grewe, V.; Champougny, T.; Matthes, S.; Frömming, C.; Brinkop, S.; Søvde, O. A.; Irvine, E. A.; Halscheidt, L. (2014): Reduction of the air traffic's contribution to climate change: A REACT4C case study. In: *Atmospheric Environment*. Vol. 94, S. 616–625.
- IMO (2014): Third IMO GHG Study. In: *International Maritime Organization*.
- IPCC (2015): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2006): Greenhouse Gas Inventories. Revised 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.
- Jackson, T. (2016): Prosperity without growth: foundations for the economy of tomorrow. Taylor & Francis.
- 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.
- Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2018): Mobilität in Deutschland MiD 2017 Ergebnisbericht.
- OECD (2019): Global Material Resources Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris.
- O'Neill, D. W. (2012): Measuring progress in the degrowth transition to a steady state economy. In: *Ecological Economics*. Elsevier. Vol. 84, S. 221–231.
- Paech, N. (2012): Befreiung vom Überfluss. oekom-Verlag.
- Pauliuk, S.; Milford, R. L.; Müller, D. B.; Allwood, J. M. (2013): The steel scrap age. In: *Environmental Science and Technology*. Vol. 47, No.7, S. 3448–3454.
- Rüter, S.; Stürmer, W.; Dunger, K. (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. In: *AFZ-DerWald*. Vol. 13, S. 30–31.
- Schipper, B. W.; Lin, H. C.; Meloni, M. A.; Wansleeben, K.; Heijungs, R.; van der Voet, E. (2018): Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. In: *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier. Vol. 132, No. October 2017, S. 28–36.
- Seidl, I.; Zahrnt, A. (2010): Postwachstumsgesellschaft: Konzepte für die Zukunft. Metropolis-Verlag GmbH.
- Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspaketes 2.3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal.
- UBA (2012): Klimawirksamkeit des Flugverkehrs - Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand über die Effekte des Flugverkehrs: Hintergrund. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit\\_des\\_flugverkehrs.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf) (28.07.2020).
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07\\_2014\\_climate\\_change\\_dt.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf) (28.07.2020).
- 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: Endbericht.

UBA Texte Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10\\_endbericht\\_energieversorgung\\_des\\_verkehrs\\_2050\\_final.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf) (28.07.2020).

UBA (2017): Klimaschutz im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen. UBA Texte 45/2017

Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-07-18\\_texte\\_45-2017\\_paris-papier-verkehr\\_v2.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-07-18_texte_45-2017_paris-papier-verkehr_v2.pdf) (28.07.2020).

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 (2020): Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück.

<https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>.  
(28.07.2020).

UNEP (2016): Global Material Flows and Resource Productivity. Assessment Report for the UNEP International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Paris.

USGS (2020): Mineral Commodity Summaries 2020.

VDV (2017): Voll elektrisch! Sonderprogramm zur Finanzierung von Elektrifizierungsvorhaben. Verband deutscher

Verkehrsunternehmen e.V., Köln. [https://www.vdv.de/voll-elektrisch\\_i.pdf?forced=true](https://www.vdv.de/voll-elektrisch_i.pdf?forced=true) (28.07.2020).

Wiesen, K.; Teubler, J.; Saurat, M.; Suski, P.; Samadi, S.; Kiefer, S. (2017): Analyse des Rohstoffaufwandes der Energieinfrastruktur in Deutschland. Sachverständigengutachten.

WWF (2009): Modell Deutschland - Klimaschutz bis 2050: Vom Ziel her denken. Endbericht. prognos, Öko-Institut, Basel/Berlin. [https://mobil.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/publikationen-PDF/WWF\\_Modell\\_Deutschland\\_Endbericht.pdf](https://mobil.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/publikationen-PDF/WWF_Modell_Deutschland_Endbericht.pdf)  
(28.07.2020).

Zimmer, W.; Cyganski, R.; Dünnebeil, F.; Peter, M.; Blanck, R.; Bergmann, T.; Mottschall, M.; von Waldenfels, R.; Förster, H.; Schumacher, K.; Wolfermann, A.; Winkler, C.; Heinrichs, M.; Fehrenbach, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Kräck, J.; Zandonella, R.; Bertschmann, D. (2016): Endbericht Renewability III - Optionen einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors. Berlin.