

CLIMATE CHANGE

03/2020

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe

Abschlussbericht

CLIMATE CHANGE 03/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 41 115 0
FB000439/3

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe

Abschlussbericht

von

Dr. Monika Dittrich, Frank Dünnebeil, Susanne Köppen,
Dr. Amany von Oehsen, Regine Vogt, Dr. Kirsten
Biemann, Horst Fehrenbach, Birte Ewers, Sonja
Limberger

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Norman Gerhardt, Dr. Sarah Becker, Dr. Diana Böttger,
Felix Frischmuth

IEE – Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik, Kassel

Dr. Karl Schoer

SSG, Wiesbaden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

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

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

Durchführung der Studie:

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

Abschlussdatum:

September 2020

Redaktion:

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

Fachgebiet I1.1 „Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,
Ressourcenschonung“
Jens Günther

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

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

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Kurzbeschreibung: Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe

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 GreenMe (Germany – resource efficient and GHG neutral – Material efficiency) ist sehr ambitioniert bei der Erschließung von Ressourceneffizienzpotenzialen und unterstellt einen hohen technologischen Wandel in Deutschland und im Ausland. Materialeffizienz-, Recycling- und Substitutionspotenziale werden in allen Bereichen der Wirtschaft erschlossen, mengenmäßig relevante Beispiele sind in der Energieerzeugung und -infrastruktur sowie im Bausektor zu finden. Der Endenergiebedarf kann von 2.500 TWh in 2015 auf nur 1.200 TWh reduziert werden (ohne rohstoffliche Bedarfe), der Anteil der erneuerbaren Energien steigt auf 74 % in 2030 und 100 % in 2050.

Im Ergebnis wird in diesem Szenario im Jahr 2050 der Primärrohstoffkonsum gegenüber 2010 um 68 % reduziert. Der Anteil der Sekundärmaterialien am gesamten (primär- und sekundär-) Rohstoffbedarf steigt auf 38 %. Pro Person werden nur noch 6,1 Tonnen Rohstoffe konsumiert, davon 2,2 Tonnen Biomasse. Der Rohmaterialkonsum entspricht etwa der Hälfte des gegenwärtigen, durchschnittlichen weltweiten Rohmaterialkonsums. Die materialeffizienten Technologien reduzieren insbesondere die Nachfrage nach Metallen signifikant.

Die nationalen Treibhausgase (nach NIR-Systematik) können bis 2050 um 96,4 % gegenüber 1990 reduziert werden. Allerdings können nur im Energie- und Verkehrssektor die Treibhausgase vollständig vermieden werden. In den anderen Quellgruppen Industrie, Landwirtschaft, Abfall und LULUCF (ohne Wald) verbleiben Treibhausgas-Emissionen, die nach dem heutigen Wissensstand noch nicht vollständig vermeidbar sind. In 2050 ist unter Einbeziehung natürlicher Senken Treibhausgasneutralität sicher erreichbar.

Abstract: Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality - GreenMe

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 GreenMe (Germany – resource efficient and GHG neutral – Material efficiency) is very ambitious in tapping resource efficiency potentials and assumes a high level of technological change in Germany and abroad. Material efficiency, recycling and substitution potentials are tapped in all areas of the economy; examples relevant with respect to quantity are found in energy generation and infrastructure as well as in the construction sector. Final energy

requirements can be reduced from 2,500 TWh in 2015 to only 1,200 TWh (without raw material requirements), the share of renewable energies increases to 74 % in 2030 and 100 % in 2050.

As a result, in this scenario in 2050 primary raw material consumption is reduced by 68 % compared to 2010. The share of secondary materials of total (primary and secondary) raw material requirements increases to 38 %. Only 6.1 tons of raw materials are consumed per person, of which 2.2 tons are biomass. Raw material consumption is about half of the current average global raw material consumption. Material-efficient technologies significantly reduce the demand for metals in particular.

National greenhouse gas emissions (calculated according to NIR) can be reduced by 96.4% by 2050 compared to 1990. 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 safely achieved by including natural sinks.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis.....	18
Zusammenfassung.....	21
Summary	30
1 Einleitung.....	38
1.1 Herausforderung Klimawandel und die Green-Szenarien	38
1.2 GreenMe: Leitlinien und Ausrichtung.....	39
1.3 Aufbau des Berichts	40
2 Methodisches Vorgehen	42
3 Allgemeine Annahmen	44
3.1 Rahmendaten.....	44
3.1.1 Bevölkerungsentwicklung	44
3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung	44
3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz.....	44
3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt	45
3.1.5 Nutzung von Biomasse.....	45
3.1.6 CCS und CCU	46
3.2 Emissionsziel 2030 und 2040	46
4 Sektorale Annahmen	47
4.1 Landwirtschaft	47
4.2 Flächennutzung und LULUCF (ohne Wald)	49
4.3 Industrie	49
4.3.1 Stahlindustrie	50
4.3.2 Nicht-Eisen-Metallindustrie	51
4.3.3 Gießereiindustrie	51
4.3.4 Chemische Industrie	52
4.3.5 Zementindustrie.....	54
4.3.6 Kalkindustrie	56
4.3.7 Glasindustrie	56
4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie	57
4.3.9 Nahrungsmittelindustrie.....	57
4.3.10 Textilindustrie	58

4.4	Abfall und Abwasser	58
4.5	Gebäude.....	59
4.5.1	Rahmenannahmen und Energienachfrage	59
4.5.2	Entwicklung des Gebäudewärmeverbrauchs	60
4.5.3	Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes	60
4.5.4	Optimierung der Wärmebereitstellung	61
4.5.5	Rohstoffliche Annahmen im Gebäudebereich.....	61
4.6	Verkehr.....	62
4.6.1	Vermeidung und Verlagerung im nationalen Personenverkehr.....	62
4.6.2	Entwicklung der Pkw-Flotten	63
4.6.3	Verlagerung im nationalen Güterverkehr.....	64
4.6.4	Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr	65
4.6.5	Internationaler Verkehr	66
4.7	Weitere Sektoren	66
4.7.1	Sonstige THG-Emissionen	66
4.7.2	Sonstige Branchen	67
4.7.3	Tiefbau	67
4.7.4	Stromnetze.....	67
4.8	Energieversorgung	69
4.8.1	Festlegung verschiedener Parameter	69
4.8.2	Technologieannahmen für Photovoltaik- und Windenergieanlagen	70
4.8.3	Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik	71
4.8.4	Markthochlauf von PtG/L und Zuordnung auf Anwendungsbereiche.....	71
4.8.5	Herkömmlicher Stromverbrauch	72
4.8.6	Biomassenutzung.....	73
4.8.7	Sonstige Rest- und Abfallströme.....	74
5	Ergebnisse	75
5.1	Energie	75
5.1.1	Endenergiebedarfe	75
5.1.2	Stromsektor	77
5.1.2.1	Strombilanz in Deutschland.....	77
5.1.2.2	Installierte Leistungen in Deutschland	78
5.1.3	Wärmesektor	81
5.1.3.1	Gebäudewärmeversorgung im Bereich Haushalte und GHD	81

5.1.3.2	Prozesswärme Industrie und GHD sowie Industriegebäude	84
5.1.4	Verkehrssektor	86
5.1.5	Gas- und PtL-Versorgung	88
5.1.6	Europäischer Rahmen	91
5.1.6.1	Strombilanz	91
5.1.6.2	Installierte Leistungen	93
5.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	94
5.2.1	Übersicht über die Entwicklung aller Treibhausgas-Emissionen	94
5.2.2	Treibhausgas-Emissionen nach Quellgruppen	96
5.2.2.1	Treibhausgas-Emissionen im Energiesektor, einschließlich Verkehr	96
5.2.2.2	Prozessbedingte THG-Emissionen der Industrie	97
5.2.2.3	Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft	99
5.2.2.4	Emissionen der Abfallwirtschaft	100
5.2.2.5	Emissionen LULUCF (ohne Wald)	100
5.2.3	Emissionen einschließlich Vorketten	101
5.2.4	Kumulierte Treibhausgas-Emissionen	103
5.2.5	Vergleich der Treibhausgasemissionen mit den GreenEe-Szenarien	104
5.3	Die Inanspruchnahme von Rohstoffen	105
5.3.1	Der gesamtwirtschaftliche Konsum von Primärrohstoffen	105
5.3.1.1	Der Konsum von Primärrohstoffen nach Rohstoffarten	105
5.3.1.2	Die Veränderung der Rohstoffproduktivität	109
5.3.1.3	Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum in 2050	111
5.3.1.4	Der Rohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfelder in 2050	112
5.3.1.5	Der kumulierte Primärrohstoffkonsum	114
5.3.1.6	Substitution von Primärrohstoffen	115
5.3.2	Rohstoffinanspruchnahme ausgewählter Rohstoffe	116
5.3.2.1	Primär- und Sekundäreinsatz von Eisen, Kupfer und Aluminium	116
5.3.2.2	Primäreinsatz ausgewählter Technologie- und Edelmetalle	118
5.3.2.3	Der Einsatz von Holz	119
5.3.2.4	Die Nutzung von Sand, Kies und Schotter	119
5.3.2.5	Knappheit und Versorgungsengpässe von Rohstoffen	119
5.3.2.6	Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe2	123
5.4	Flächennutzung	124

6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	126
7	Quellenverzeichnis	130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung Z- 1:	Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenMe.....	23
Abbildung Z- 2:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenMe.....	24
Abbildung Z- 3:	Primärrohstoffkonsum nach Materialgruppen in 2010, 2030, 2040 und 2050.....	26
Abbildung Z- 4:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050.....	28
Figure Z- 5:	Development of final energy demand in GreenMe	32
Figure Z- 6:	Net electricity generation in Germany in GreenMe.....	33
Figure Z- 7:	Primary raw material consumption by material category in 2010, 2030, 2040 and 2050	34
Figure Z- 8:	Greenhouse gas emissions by sources, 1990 – 2050	36
Abbildung 1:	Entwicklung der Endenergiebedarfe	75
Abbildung 2:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland	77
Abbildung 3:	Installierte Leistungen in Deutschland	79
Abbildung 4:	Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050	80
Abbildung 5:	Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Raum- und Trinkwarmwasserwärme in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden (GHD) – GreenMe = GreenEe1/Ee2	82
Abbildung 6:	Deckung der Wärmenachfrage (Raumwärme und Trinkwarmwasser) im Bereich Wohngebäude und GHD- Nichtwohngebäude in GreenMe	83
Abbildung 7:	Zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD- Prozesswärme	85
Abbildung 8:	Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme	86
Abbildung 9:	Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und - versorgung.....	88
Abbildung 10:	Notwendiger Markthochlauf für eine PtG/L-Import- Infrastruktur	89
Abbildung 11:	Zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe).....	90
Abbildung 12:	Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert)	91
Abbildung 13:	Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050.....	92
Abbildung 14:	Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenMe.....	93
Abbildung 15:	Installierte Leistungen Europa in 2050.....	94
Abbildung 16:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050.....	95
Abbildung 17:	THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte, 2010 bis 2050 ..	102

Abbildung 18:	THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050	103
Abbildung 19:	Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050	104
Abbildung 20:	Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050...	108
Abbildung 21:	Letzte inländische Verwendung der Primärbasis- und Technologie- bzw. Edelmetalle, 2010 bis 2050	109
Abbildung 22:	Entwicklung von ausgewählten Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050	110
Abbildung 23:	Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität, 1994 bis 2050.....	111
Abbildung 24:	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person, 2010 bis 2050	112
Abbildung 25:	Der RMC nach Verwendungskategorien, 2010 und 2050	113
Abbildung 26:	Der Konsum der privaten Haushalte nach Bedürfnisfelder, 2010 und 2050.....	114
Abbildung 27:	Kumulierter Primärrohstoffkonsum (LIV), 2010 bis 2050	115
Abbildung 28:	Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 – 2050	116
Abbildung 29:	Primär- und Sekundärbasismetallmengen in der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050.....	117
Abbildung 30:	Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018	121
Abbildung 31:	Kumulierte Nachfrage ausgewählter Rohstoffe als Anteil der Reserven in 2018	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich.....	39
Tabelle 2:	Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung	44
Tabelle 3:	Energetische Nutzung der Restbiomassepotenziale bis 2050..	45
Tabelle 4:	Versorgungsbilanzen tierischer Produkte	48
Tabelle 5:	Entwicklung der Viehbestände	48
Tabelle 6:	Annahmen Stahlindustrie	50
Tabelle 7:	Annahmen NE-Metallindustrie	51
Tabelle 8:	Annahmen Gießereiindustrie	52
Tabelle 9:	Annahmen chemische Industrie	53
Tabelle 10:	Annahmen Zementindustrie im GreenMe-Szenario	54
Tabelle 11:	Annahmen Faserbeton	55
Tabelle 12:	Ersetzte Mengen und Faserbedarf für Faserbeton	55
Tabelle 13:	Annahmen Kalkindustrie	56
Tabelle 14:	Annahmen Glasindustrie	57
Tabelle 15:	Annahmen Nahrungsmittelindustrie	57
Tabelle 16:	Annahmen Textilindustrie	58
Tabelle 17:	Annahmen Abfall und Abwasser im GreenMe-Szenario	59
Tabelle 18:	Wesentliche Rahmenparameter im Gebäudebereich.....	59
Tabelle 19:	Nutz- und Endenergie der Wohn- und Nichtwohngebäude in 2030, 2040 und 2050 in TWh	60
Tabelle 20:	Nationale Personenverkehrsleistungen in den GreenEe- Szenarien und in GreenMe	63
Tabelle 21:	Annahmen zu Reichweiten neu zugelassener Elektro-Pkw in GreenMe und den GreenEe-Szenarien.....	63
Tabelle 22:	Leichtbauvarianten neu zugelassener Elektro-Pkw in GreenMe und den GreenEe-Szenarien	64
Tabelle 23:	Nationale Güterverkehrsleistungen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	65
Tabelle 24:	Anteile vollelektrischer Oberleitungs-Lkw an den Neuzulassungen in GreenMe	66
Tabelle 25:	Technische Basisdaten für den Vergleich zwischen Kupfer und Aluminium	68
Tabelle 26:	Annahmen zur Aufteilung Kupfer- und Aluminiumbasierte Leitungen/Kabel in Prozent	68
Tabelle 27:	Überblick zu den Annahmen in der Energieversorgung in GreenMe im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien	69
Tabelle 28:	Klassischer Stromverbrauch GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	72
Tabelle 29:	Stromerzeugung in GreenMe	73
Tabelle 30:	Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien	73

Tabelle 31:	Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industriellen Reststoffen) in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	74
Tabelle 32:	Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenMe im Vergleich mit GreenEe	74
Tabelle 33:	Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	76
Tabelle 34:	Nettostromverbrauch zuzüglich Verluste in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2.....	78
Tabelle 35:	Nettostromerzeugung in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	78
Tabelle 36:	Markthochlauf Wind-Onshore und PV	80
Tabelle 37:	Installierte Leistungen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	81
Tabelle 38:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	83
Tabelle 39:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	84
Tabelle 40:	EEV nach Verkehrsmitteln GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	86
Tabelle 41:	EEV nach Energieträgern GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	87
Tabelle 42:	Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2	89
Tabelle 43:	Entwicklung der PtG/L-Importmengen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2.....	90
Tabelle 44:	Emissionsminderungen GreenMe in 2030 und 2050 gegenüber 1990.....	95
Tabelle 45:	Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO ₂ Äq	96
Tabelle 46:	Prozessbedingte Treibhausgasemissionen nach Industriesektoren in t CO ₂ Äq	98
Tabelle 47:	THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO ₂ Äq.....	98
Tabelle 48:	THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO ₂ Äq	99
Tabelle 49:	Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft in t CO ₂ Äq	99
Tabelle 50:	THG-Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen in t CO ₂ Äq.....	100
Tabelle 51:	Treibhausgasemissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO ₂ Äq	100
Tabelle 52:	Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO ₂ Äq	100
Tabelle 53:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2 in Tsd. Tonnen CO ₂ Äq	105

Tabelle 54:	Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010, 2030, 2040 und 2050 in Mio. t RME	105
Tabelle 55:	Inländische Nachfrage nach ausgewählten Metallen, 2030, 2040 und 2050.....	118
Tabelle 56:	Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien.....	119
Tabelle 57:	Der Rohstoffkonsum (RMC) in GreenMe und GreenEe2 im Vergleich	123
Tabelle 58:	Flächennutzung in Deutschland in 2010, 2030, 2040 und 2050.....	124

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
CO₂	Kohlendioxid
CO₂Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
CH₄	Methan
Csyn	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 Rohstoffmodel
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. Weitestgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, 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 weiteren Optionen bestehen, um in 2050 eine mindestens 95 %ige Minderung von Treibhausgasemissionen zu erreichen?
2. Wie kann bzw. muss der Weg dorthin gestaltet werden?
3. Welcher Rohstoffkonsum ist mit den Transformationswegen verbunden?

Zur Beantwortung der Fragen wurden in enger Zusammenarbeit zwischen dem Umweltbundesamt und der Autorenschaft insgesamt sechs Szenarien entworfen, die unterschiedliche Ambitionsniveaus und Veränderungsgeschwindigkeiten beinhalten. Die folgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Green-Szenarien und ihre jeweiligen Ambitionsniveaus im Vergleich. Das Umweltbundesamt hat auf den Arbeiten dieses Projektes aufbauend auch entsprechende Publikationen erstellt, siehe www.uba.de/rescue-projekt. Dieser Bericht dokumentiert das Szenario Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Material Efficiency, kurz: GreenMe.

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

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 GreenMe

GreenMe („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Material efficiency“) setzt wie die GreenEe-Szenarien im Wesentlichen auf technische Maßnahmen bei der Transformation Deutschlands. Das Narrativ von GreenMe wird ausführlich in UBA (2019a) erläutert. Im Folgenden erfolgt eine Zusammenfassung der wesentlichen Leitlinien, die für das Verständnis des Berichts relevant sind. Neben der Energieeffizienz wird hier im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien nochmals eine Steigerung der Materialeffizienz in allen Wirtschaftssektoren angenommen. Klimaschutz, Dekarbonisierung, konsequente Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz sind in diesem Szenario zentral. Auch international setzt sich dieses Verständnis in hohem Tempo durch, so dass bis 2050 global ein vergleichbarer Stand der technologischen Entwicklung vorherrscht. Dies ermöglicht die Entwicklung globaler Märkte für erneuerbare Energieträger und Carbon Leakage stellt somit keine ausgeprägte Bedrohung der nationalen industriellen Produktion dar. Deutschland ist weiterhin eng, jedoch mit einer im Vergleich zu GreenEe1 und GreenLate ausgeglicheneren Handelsbilanz, in den internationalen Handel eingebunden. In Folge reduzieren sich nationale Produktionsmengen. Gleichzeitig erhöhen sich die Innovationsanstrengungen, die Qualität der produzierten Güter und der Ausbau des Dienstleistungssektors.

Die Transformation der Energieversorgung erfolgt ähnlich wie in anderen Green-Szenarien und beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien, inklusive des Imports erneuerbarer Energieträger. Das bedeutet, dass effiziente Sektorkopplungstechniken die direkte oder indirekte Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien in allen Anwendungsbereichen ermöglichen und dort, wo technisch möglich, erneuerbarer Strom direkt genutzt wird. Im GreenMe-Szenario werden zur Nutzenergieerzeugung vor allem Techniken mit geringem Primärrohstoffbedarf pro Leistung unterstellt. So findet beispielsweise bei der Photovoltaik ein stärkerer Ausbau auf Dachflächen mit Dünnschichtzellen statt. Auch werden beispielsweise Fundamente, Aufständereien und Windtürme robust und langlebig ausgeführt, so dass deren Lebensdauer deutlich erhöht werden kann. Materialsubstitutionen bei Leitungen und Strommasten reduzieren die Rohstoffaufwendungen zusätzlich. Die Steigerungen der Materialeffizienz in der deutschen Wirtschaft in der Vergangenheit werden mit hohen Recyclinganstrengungen über alle Materialgruppen hinweg, neuen Technologien (wie Textilbetone und PtX-Techniken) und Materialsubstitutionen (einschließlich Leichtbau und der Substitution abiotischer Rohstoffe durch Biomasse) weiter erhöht. So sind beispielsweise rohstoffeffiziente Bauweisen einschließlich Holzbauweisen bei neuen Gebäuden weit verbreitet. Gebäude im Bestand sind bis zum Jahr 2050 stark modernisiert und saniert, so dass der Energiebedarf sich im erheblichen Maße reduziert und vollständig durch erneuerbare und effiziente Wärmeversorgung mit Wärmepumpen und Wärmenetzen gedeckt wird.

Wie in anderen Green-Szenarien ist die Elektromobilität die wesentliche Technologie im Mobilitätssektor, Vermeidung und Verlagerung auf ÖPNV werden auch in GreenMe vergleichbar den GreenEe-Szenarien unterstellt. Im GreenMe-Szenario sind insbesondere ambitionierte Annahmen im Bereich Leichtbau und Batterietechnologien unterstellt. Die Anstrengungen bei

der Erhöhung der Materialeffizienz mindern die Gütermengen und in Folge die benötigte Güterverkehrsleistung im Vergleich zu GreenEe2 zusätzlich.

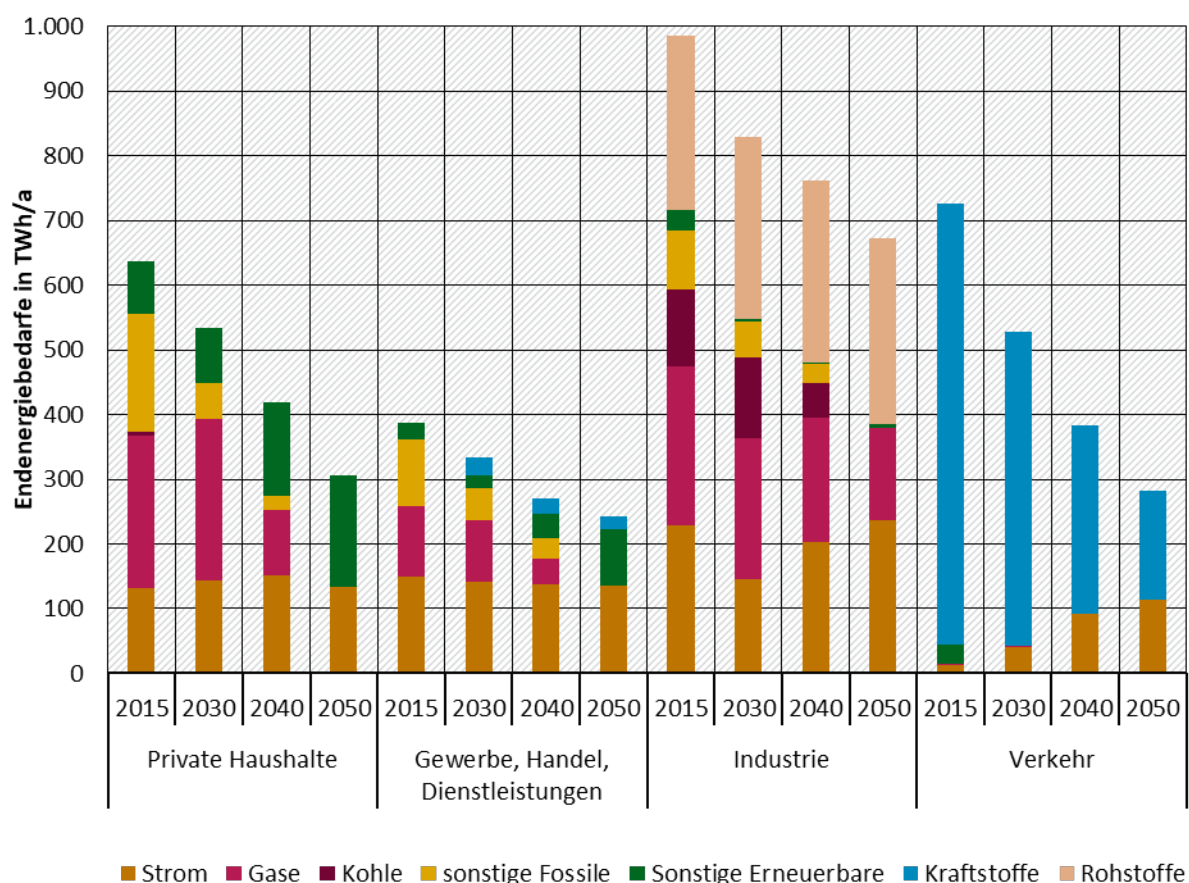
In der Landwirtschaft werden ambitionierte technische Maßnahmen wie reduzierter Mineraldüngereinsatz und Wirtschaftsdüngermanagement unterstellt. Gesundere Ernährungsgewohnheiten in und außerhalb Deutschlands tragen zur Reduktion des Exportüberschusses an Fleisch und Fleischprodukten bei, wodurch Tierbestände in Deutschland weiter reduziert werden können. Die landwirtschaftlich genutzten Flächen auf trockengelegten Mooren werden bis 2050 sukzessive renaturiert und der Torfabbau vollständig beendet.

Wesentliche Ergebnisse

Energie

Im GreenMe-Szenario sinkt der Endenergiebedarf über alle Anwendungsbereiche in 2050 auf 1.502 TWh. Den größten Anteil von 672 TWh verbraucht die Industrie (44,7 %), 282 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (20,4 %), dem Verkehr (18,8 %) und GHD (16,1 %).

Abbildung Z- 1: Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenMe

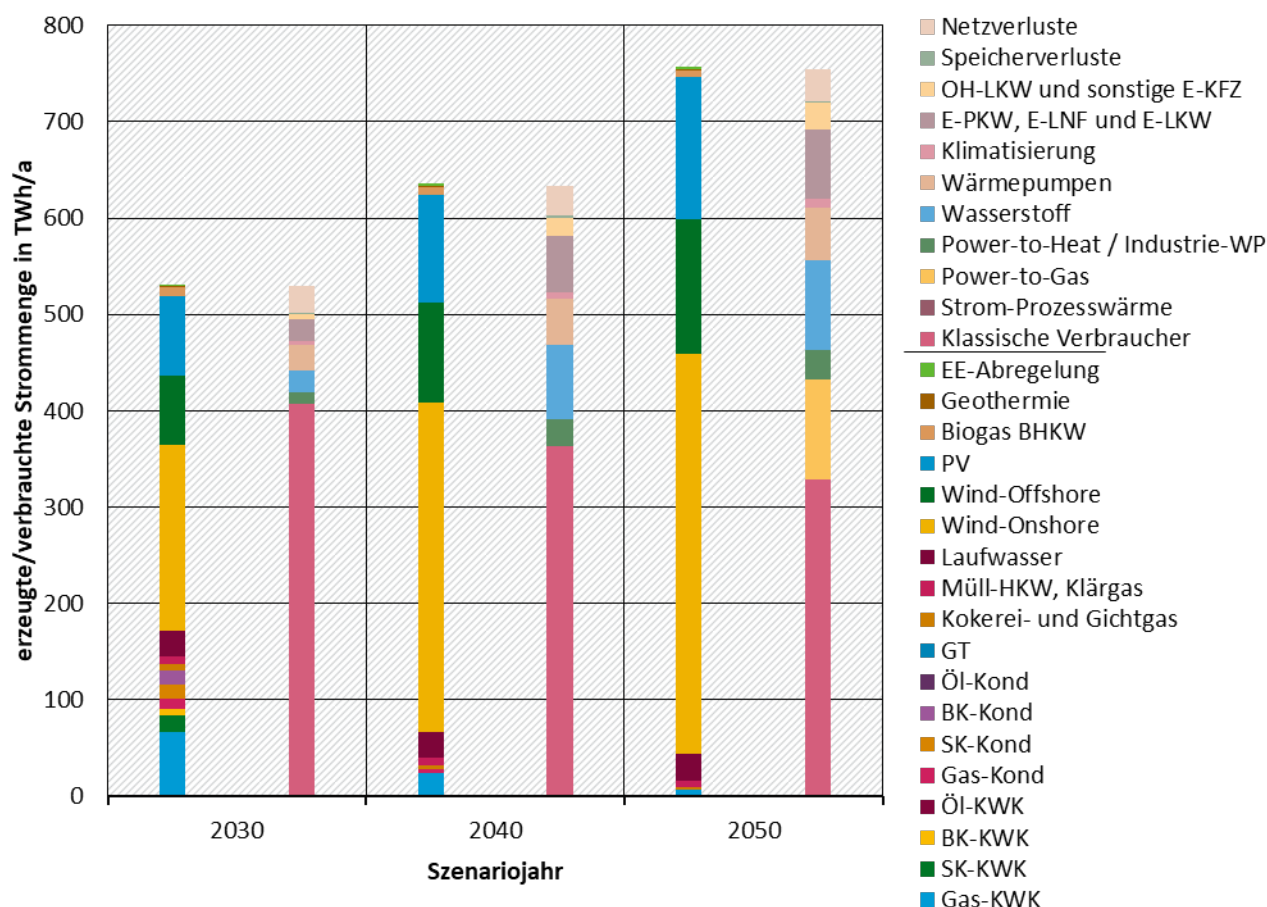


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Die nationale Nettostromerzeugung steigt kontinuierlich auf insgesamt 754,2 TWh in 2050 und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien produziert. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Techniken, die im Transformationspfad kontinuierlich ausgebaut werden. In 2050 liegt die installierte Leistung bei 125,1 GW

Windkraftanlagen onshore, 33,7 GW Windkraftanlagen offshore sowie 143,5 GW Photovoltaikanlagen.

Abbildung Z- 2: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenMe



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

Aus dem Vergleich mit dem GreenEe2-Szenario zeigt sich der Einfluss der Materialeffizienz bei gleicher Annahme zur gleichen Handelsbilanz. Hier wird deutlich, dass es langfristig 2050 insbesondere weniger PV (-25 GW gegenüber GreenEe2) braucht, um eine geringere nationale direkte Stromnachfrage decken zu können. Die installierten Windleistungen liegen im gleichen Bereich. Gas nimmt aufgrund des Fuel-Switchs bereits 2030 eine stärkere Rolle als Brückentechnologie in der Stromerzeugung (+ 23 TWh) ein, während der Anteil von Kohlestrom geringer ist (-20 TWh). Durch beide Maßnahmen können in Summe fossile Rohstoffe gespart werden.

Auch im GreenMe-Szenario werden Energieträger importiert. Diese sind allerdings nicht mehr fossilen Ursprungs, sondern auf der Basis von erneuerbaren Energien hergestellte synthetische Energieträger. Sie werden in Anwendungsbereichen eingesetzt, in denen eine direkte Stromnutzung nicht möglich ist, darunter als Ausgangsrohstoff für die chemische Industrie und im Verkehrsbereich (insb. im Flug- und Seeverkehr). Insgesamt werden rund 480 TWh PtG/L in 2050 importiert.

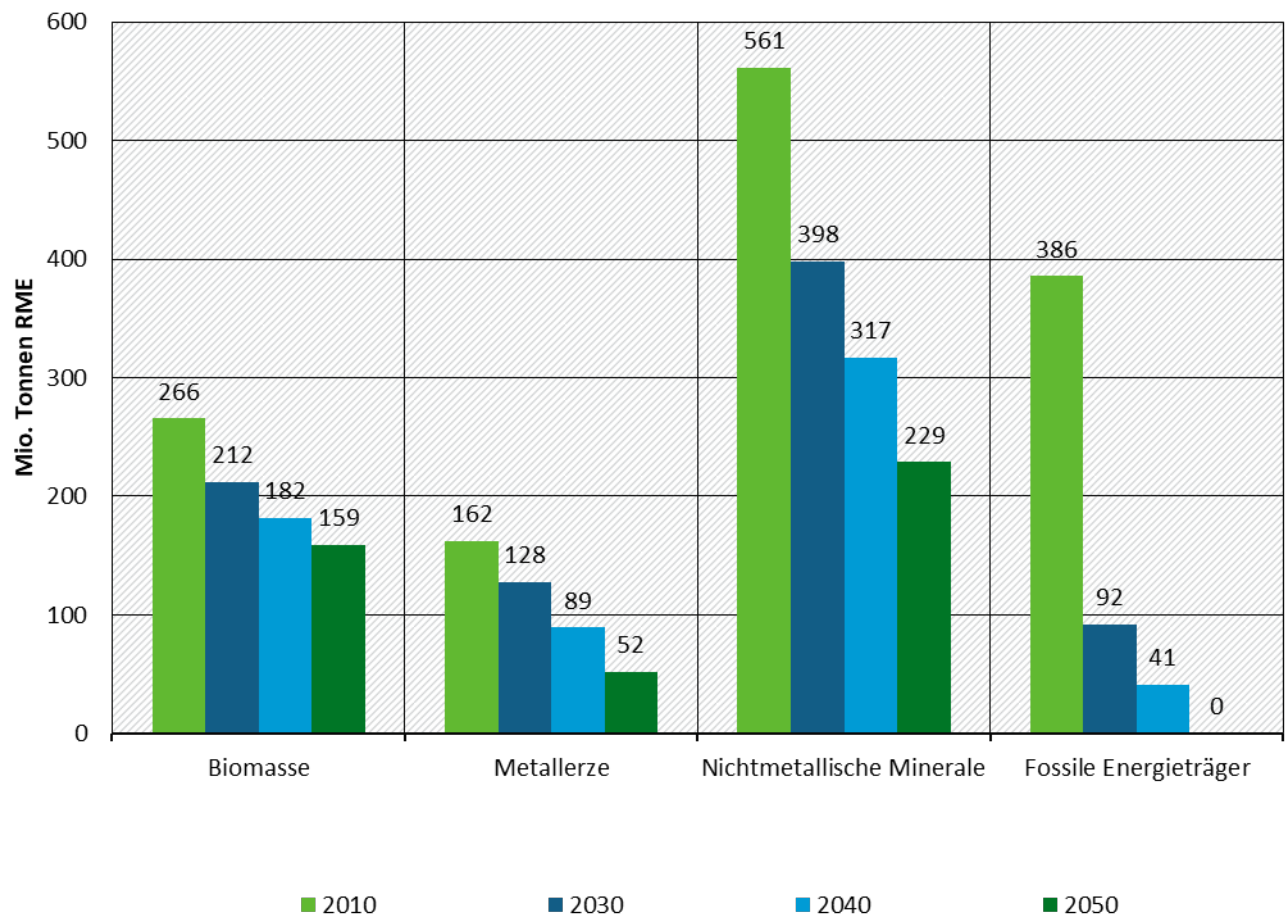
Im Verkehrssektor liegt der Endenergieverbrauch in 2050 bei insgesamt 284 TWh. Davon entfallen 195 TWh auf den nationalen Verkehr und 89 TWh auf den internationalen Verkehr. Trotz erheblicher Rückgänge liegen die höchsten Verbräuche weiterhin im motorisierten

Individualverkehr (94 TWh in 2050 ggü. 384 TWh in 2010), gefolgt vom internationalen Flugverkehr, der nur einen leichten Rückgang aufweist. Stark rückläufig ist der Endenergieverbrauch im Güterverkehr, sowohl im Straßen-, Schienen- als auch Schiffsverkehr. Es zeigt sich, dass in GreenMe der nationale Verkehr bereits im Jahr 2030 2 % weniger Endenergie benötigt als im GreenEe2-Szenario, und bis 2050 diese zusätzliche Endenergieeinsparung auf 6 % steigt. Dabei sind die zusätzlichen Einsparungen im Jahr 2050 im Güterverkehr mit 9 % höher als im Personenverkehr mit 4 %. Auch im internationalen Verkehr führen die zusätzlich angenommenen technischen Verbesserungen, speziell in der Seeschifffahrt zu zusätzlichen Endenergieeinsparungen um 1 % (2030) bis 3 % (2050). Während im Personenverkehr nur weitere Effizienzverbesserungen in den Antriebskonzepten unterstellt wurden, konnte im Güterverkehr in GreenMe zusätzlich zur Effizienz durch angenommene langfristige Vollelektrifizierung von Oberleitungs-Lkw höhere Einsparungen erreicht werden. Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenMe etwa 2 % weniger Kraftstoff und ebenso 2 % weniger Strom benötigt als in GreenEe2. Im Jahr 2050 werden in GreenMe 1 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 12 % (national) bzw. 8 % (Summe national und international) niedriger als in GreenEe2.

Rohstoffe

Die Transformation einschließlich der Materialeffizienzansätze, die in GreenMe angenommen wurden, führen zu einer Reduktion des Primärrohstoffkonsums (Raw Material Consumption (RMC)) um 68 % gegenüber 2010 auf insgesamt 439,5 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente (RME). Dabei tragen die Umstellung auf erneuerbare Energieträger und die Technologien zur höheren Schrottverwertung in der Metallindustrie erheblich zur Reduktion der nachgefragten Primärrohstoffe bei. In 2050 werden aufgrund der Transformation in Deutschland und im Rest der Welt keine fossilen Rohstoffe mehr verbraucht. Weiterhin sind auch die Rückgänge des Konsums der mineralischen Rohstoffe hervorzuheben (-60 %), die durch den Rückgang der Nachfrage aus dem Bausektor, aber auch aufgrund der Nutzung von Leichtbau- und Holzbauweisen sowie aufgrund eines hohen Recyclings möglich werden.

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



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

Die Gesamtrohstoffproduktivität (letzte Verwendung / Rohmaterialinput) steigt zwischen 2010 und 2030 [2030 bis 2040 / 2040 bis 2050] um 3,1 % [3,0 %/3,8 %] im Jahresdurchschnitt. In 2050 liegt sie um 537 Indexpunkte im Vergleich zum Jahr 1994 höher.

Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte sinkt auf 191 Mio. Tonnen RME in 2050. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist in 2050 das rohstoffintensivste mit 97,0 Mio. Tonnen RME, gefolgt vom Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus (36,2 Mio. t RME) und Wohnen und Haushalt (28,5 Mio. t RME).

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen auf insgesamt fast 36,7 Mrd. Tonnen RME. Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (46,3 %), gefolgt von biotischen Materialien (25,3 %) und fossilen Rohstoffen (17,3 %).

Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 270 Mio. Tonnen Primärrohstoffe eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 38 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 führt die sehr ressourceneffiziente Transformation in GreenMe zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 16,3 % niedriger als in GreenEe2. Der Unterschied ist in 2050 bei den fossilen Rohstoffen und bei den Metallerzen besonders ausgeprägt, was unter anderem auch auf die

angenommenen technologischen Änderungen im Rest der Welt zurückzuführen ist. Der Konsum von Biomasse ist ähnlich wie der in GreenEe2. Die Effekte – einerseits eine steigende Effizienz der Holzverarbeitung und andererseits die Substitution abiotischer durch biotische Materialien gleichen sich in beiden Szenarien aus. Dabei verschiebt sich die inländische Nachfrage nach Holz im Vergleich zu heute: sie sinkt, weil Primärholz nicht mehr energetisch genutzt wird und weil verschiedene Sektoren wie die Papier- oder Verpackungsindustrie weniger Holzprodukte nachfragen. Andererseits steigt die Nachfrage aus dem Bausektor (Hoch- und Tiefbau) in GreenMe besonders stark, wodurch abiotische Rohstoffe substituiert werden. Ein wichtiger Effekt dieser Verschiebung ist die Bindung von CO₂ in der Technosphäre über mehrere Dekaden, was eine zusätzliche Senke darstellt.

In Folge des niedrigeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person bei 6,1 Tonnen in 2050 und damit 16,3 % niedriger als in GreenEe2. Dies ist eine Reduktion um 68 % gegenüber 2010 und etwa die Hälfte des gegenwärtigen globalen Durchschnittskonsums. Der Konsum von Lebensmitteln stellt dabei den größten Anteil des Konsums in 2050, während die Rohstoffaufwendungen für Mobilität, Wohnen und Freizeit signifikant sinken. Trotz Reduktion der absoluten Rohstoffmengen bleiben die Rohstoffaufwendungen für die Unterhaltung und Erneuerung der bestehenden Gebäude- und Infrastrukturen weiterhin vergleichsweise hoch.

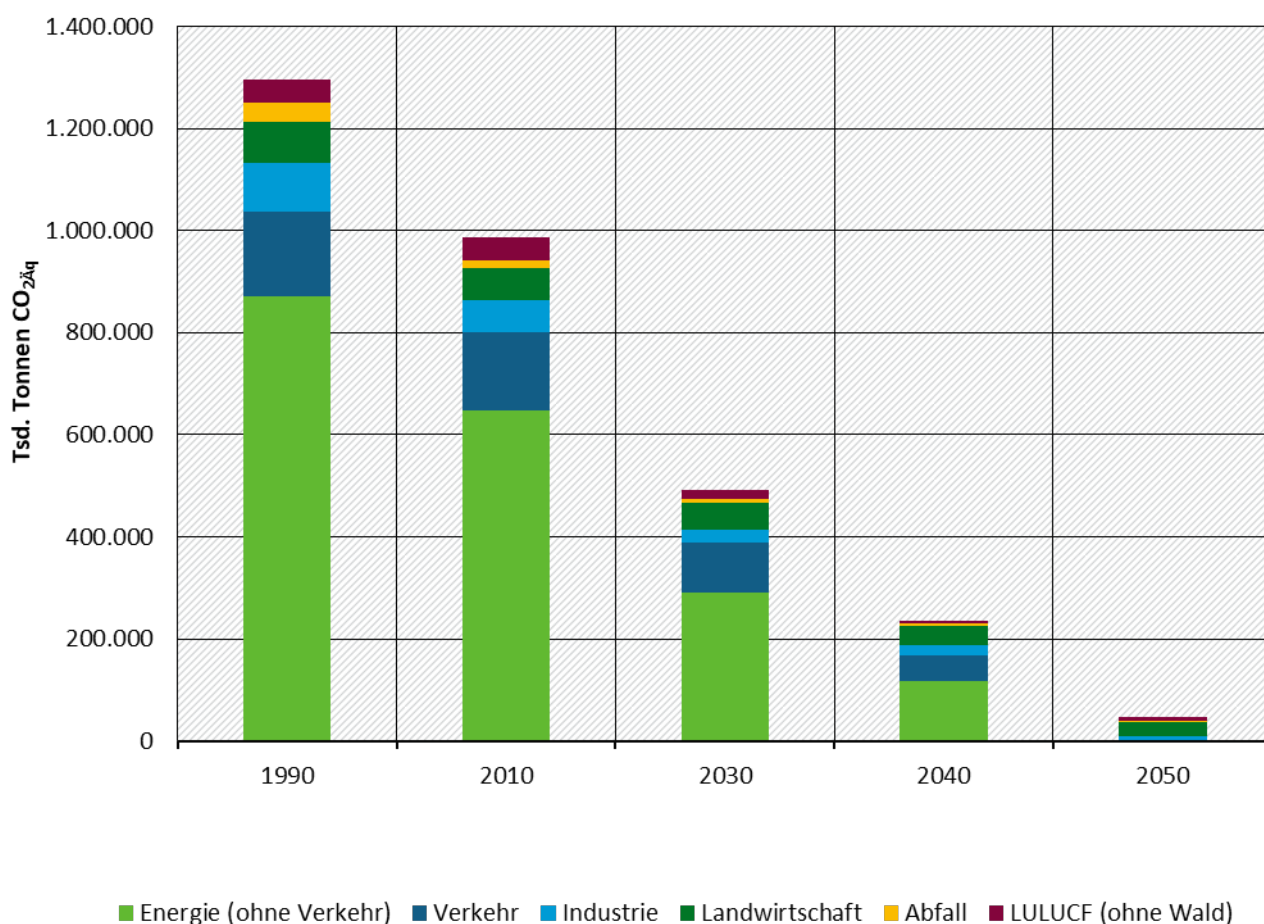
Die Nachfrage nach Rohstoffen liegt in GreenMe für fast alle untersuchten Metalle niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Die Ausnahme ist Aluminium, das, den Annahmen des Szenarios entsprechend, als Substitut für Eisen und Kupfer insbesondere in 2030 stark nachgefragt wird. Besonders ausgeprägt ist die geringere Nachfrage bei Technologiemetallen wie Siliziummetall oder Silber, die in materialsparenden und langlebigeren Technologien in GreenMe in einem geringeren Umfang als in den GreenEe-Szenarien erforderlich sind. Gleichwohl ist die Nachfrage nach Metallen, die wie beispielsweise Lithium für die neuen Schlüsseltechnologien gebraucht werden, in allen Szenarien und damit auch in GreenMe sehr hoch. GreenMe zeigt somit, dass die Auswahl von ressourcenschonenden Technologien einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Rohstoffnachfrage erbringen kann.

Treibhausgasemissionen

Im GreenMe-Szenario sinken die THG-Emissionen – gerechnet nach NIR – auf 46,293 Mio. t CO₂Äq in 2050 und gehen damit um -96,4 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück. Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei -62,0 % [-81,8 %]. Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (-84,1 %). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 34,3 % gegenüber 1990 zurückgehen. In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, treibhausgasneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei -100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 92,4 %, 85,6 % und 89,2 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur -66,8 %.

Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs zu nennen. Im Verkehr setzen sich die THG-Emissionen aus den THG-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt und des Flugverkehrs zusammen. Bis 2030 sinken diese auf insgesamt 30,2 Mio. t CO₂Äq. In 2040 und 2050 wird der internationale Verkehr vollständig mit synthetischen erneuerbaren Kraftstoffen versorgt und verursacht bilanziell keine Treibhausgasemissionen.

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



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

Die prozessbedingten THG-Emissionen aus der Industrie betragen im Jahr 2050 insgesamt 10,4 Mio. t CO₂Äq. Dabei sind in allen Industriezweigen Rückgänge bereits über den Pfad zu verzeichnen. In 2050 dominieren die THG-Emissionen der Zementindustrie diese mit 49,6 %, gefolgt von der Kalk- und Glasindustrie (27 % und 4,2 %). Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr. Zusätzlich entstehen fluorierter Treibhausgase. Sie gehen bis 2050 auf insgesamt 1,2 Mio. t CO₂Äq zurück. Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,76 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO₂Äq.

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 66,8 % in 2050 gegenüber 1990. Der größte absolute Rückgang geht dabei auf die Tierhaltung zurück (-24,8 Mio. t CO₂Äq), der größte prozentuale Rückgang verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (-90,8 %). Die THG-Emissionen im Abfallsektor gehen auf 2,9 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Etwa die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen. Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Die verbleibenden THG-Emissionen werden auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen verursacht.

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

weitere 14,72 Mrd. t CO₂Äq hinzu. Der Großteil von 9,88 Mrd. t entsteht im Zeitraum bis 2030. 62,2 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt (ohne Verkehr), 16,7 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,1 % und auf die Landwirtschaft 7,7 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050.

Auch die THG-Emissionen, die der deutsche Konsum verursacht, sind rückläufig. Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit in 2050 [2030/2040] nur noch 35 [475/219] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von -96,4 % gegenüber 2010 entspricht (gerechnet nach dem UGR-Konzept). In den Stützjahren dominieren die energiebedingten THG-Emissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen.

Aufgrund der höheren Materialeffizienz und des geringeren Handelsüberschusses im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien und der daraus folgenden geringeren Produktionsmengen entstehen im GreenMe-Szenario weniger Treibhausgas-Emissionen als im GreenEe1 bzw. GreenEe2-Szenario. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 4,6 % [8,1 %/14,3 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1. Der relevanteste Unterschied von 6,4 Mio. t CO₂Äq in 2050 (14,3 Mio. t CO₂Äq in 2030 / 15,2 Mio. t CO₂Äq in 2040) geht auf die Verringerung der Handelsüberschüsse zurück. Die höhere Materialeffizienz führt zu einem weiteren Rückgang von 1,3 Mio. t CO₂Äq in 2050 (1,7 Mio. t CO₂Äq in 2030 / 2,3 Mio. t CO₂Äq in 2040), besonders ausgeprägt bei den nicht-energetischen THG-Emissionen in der Industrie.

Das GreenMe-Szenario zeigt, dass ambitionierte Primärrohstoffeinsparungen, neben notwendigen technischen Änderungen und Verhaltensänderungen, einen wichtigen Beitrag zur zusätzlichen Minderung von Treibhausgasemissionen leisten können.

Summary

Background and objective

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, 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 Z-1 shows the 'Green' scenarios and their respective ambition levels in comparison. The German Environment Agency has also written publications based on the work of this project, see www.uba.de/rescue-projekt. This report documents the scenario "Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Material Efficiency", in short GreenMe.

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

	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Energy efficiency	Very high	Very high	Medium	Very high	Very high	Very high
Material efficiency	High	High	Medium	Very high	High	Very high
Technological innovation	High	High	Gering	Very high	High	Very high
Sustainable action	Medium	Medium	Gering	Medium	Very high	Very high
Economic growth restraint	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium	Very high
Alignment of global technical development	Low	Low	Low	High	Low	High
Reduction of new soil sealing	High	High	High	High	Very high	Very high

Climate protection efforts before 2050	High	High	Low	High	High	Very high
---	------	------	-----	------	------	-----------

Source: own illustration based on UBA (2019a)

Narrative of the GreenMe scenario

As the GreenEe scenarios, GreenMe („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Material efficiency“) essentially relies on technical measures for the transformation of Germany. The GreenMe narrative is explained in detail in UBA (2019a). The following is a summary of the main guidelines that are relevant for understanding the report. In comparison to the GreenEe scenarios, an additional increase in energy and material efficiency in all economic sectors is assumed. Climate protection, decarbonisation, systematic energy saving and more resource protection are central to this scenario. These priorities also rapidly become prevalent internationally, so that by 2050 a comparable level of technological development will prevail globally. Global markets for renewable energy sources are developed, and carbon leakage does not pose a threat to national industrial production. Germany's economy is still closely interlinked through international trade, but its balance of trade is more even compared to GreenEe1 and GreenLate. As a result, national production volumes are reduced. At the same time, innovation efforts, the quality of the goods produced and the expansion of the service sector are increasing.

Energy supply is transformed in a similar manner as in other Green-scenarios. In 2050, energy supply is entirely based on renewable energies, including the import of renewable energy carriers. This means that efficient sector coupling technologies enable the direct and indirect use of electricity from renewable energies in applications. Wherever technically possible, renewable electricity is used directly. In GreenMe, technologies with a low primary raw material requirement per output are assumed to be the main source of energy. For example, in photovoltaics thin-film cells on rooftops are used more frequently. Foundations, elevations and wind towers are designed to be robust and durable, so that their service life can be significantly increased. Material substitutions for cables and power poles further reduce raw material requirements. Compared to past increases in material efficiency, increases in material efficiency are larger as recycling efforts across all material groups are intensified, new technologies (such as textile concretes and PtX techniques) are implemented and materials are substituted (including lightweight construction and the substitution of abiotic raw materials with biomass). Raw material-efficient construction methods, including timber construction, are widely used for new buildings. Existing buildings are extensively modernised and refurbished by 2050, so that energy demand is significantly reduced and fully covered by efficient and renewable heat supply from heat pumps and heating networks.

As in other Green-scenarios, electric mobility is the main technology in the mobility sector in GreenMe. Assumptions on avoidance and shift to public transport are comparable to the GreenEe scenarios. Particularly ambitious assumptions are made in the area of lightweight construction and battery technology. Efforts to increase material efficiency further reduce the quantities of goods and, as a result, the required freight transport compared to GreenEe2.

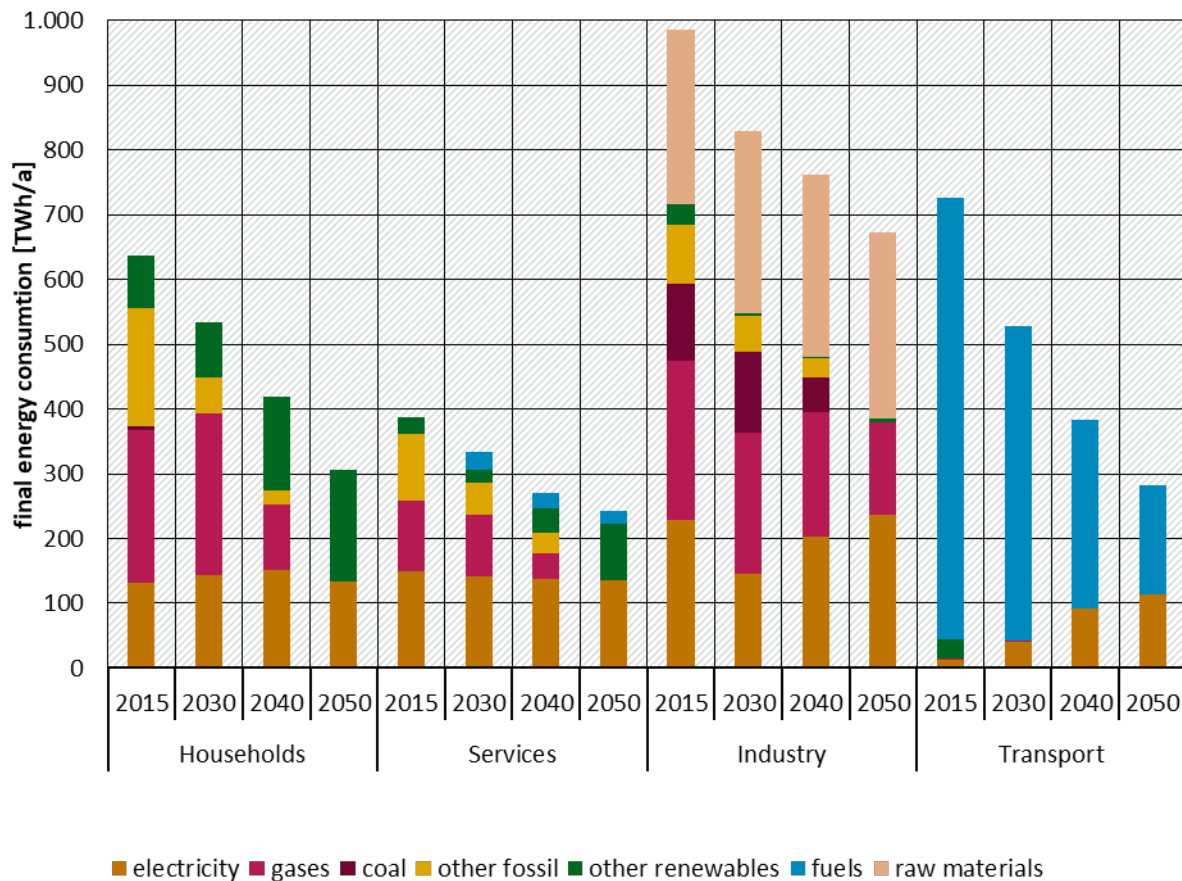
In agriculture, ambitious technical measures are assumed, such as reduced use of mineral fertilizers and manure management. Healthier eating habits in and outside Germany contribute to a reduction in the export surplus of meat and meat products, which means that animal stocks in Germany can be further reduced. By 2050, agriculturally used land on drained moors is successively renaturalised and peat extraction is completely stopped.

Main results

Power

In GreenMe, final energy demand across all applications drops to 1,502 TWh in 2050. The largest share of 672 TWh is consumed by industry (44.7 %), 282 TWh of this for raw material use in the chemical industry, followed by private households (20.4 %), transport (18.8 %) and GHD (16.1 %).

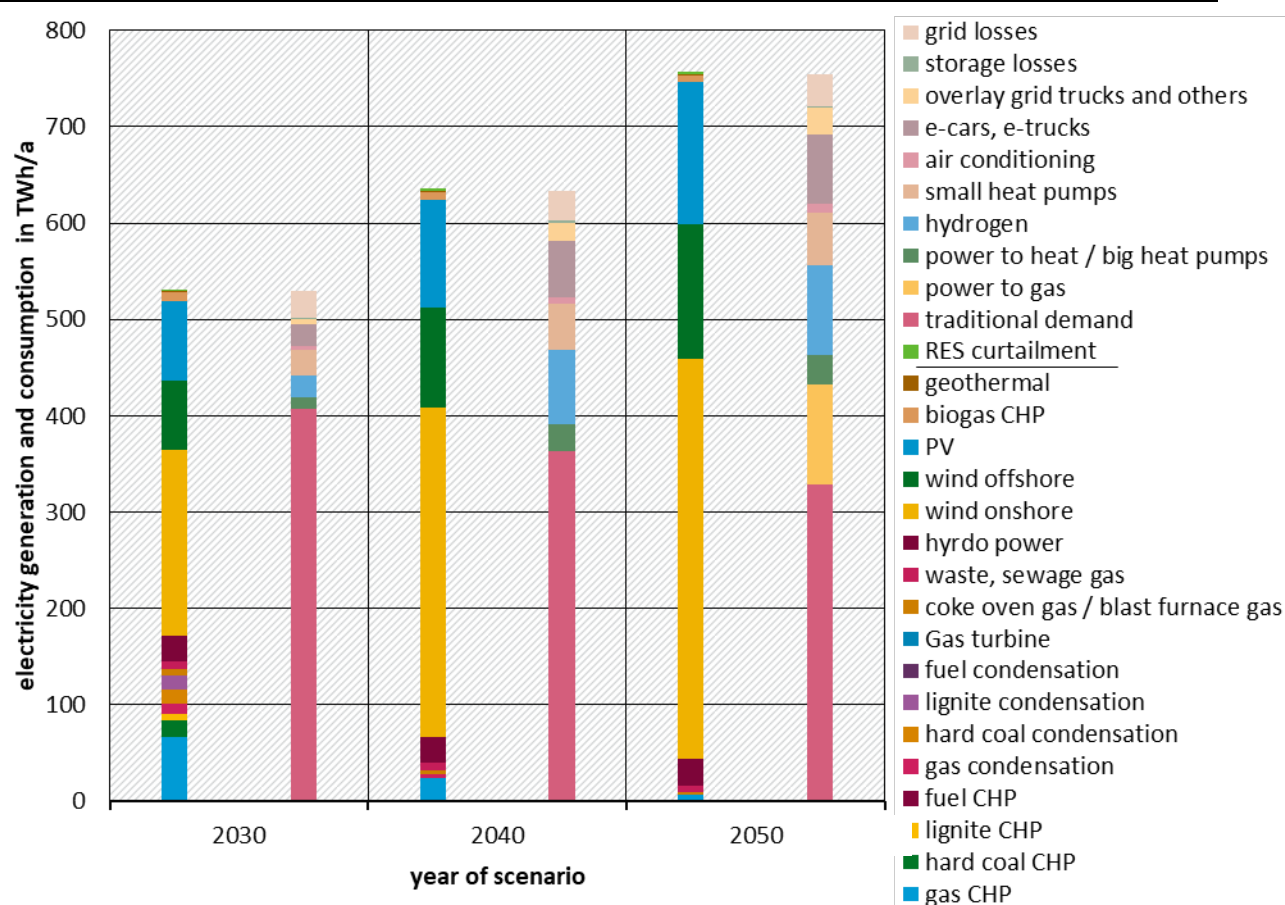
Figure Z- 5: Development of final energy demand in GreenMe



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

National net electricity generation increases continuously to 754.2 TWh in 2050 and is produced exclusively with renewable sources in that year. Wind power plants on- and offshore as well as photovoltaics are the dominant technologies, which are continuously expanded during the transformation period. In 2050, the installed capacity is 125.1 GW of onshore wind power, 33.7 GW of wind power offshore and 143.5 GW of photovoltaic.

Figure Z- 6: Net electricity generation in Germany in GreenMe



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

The comparison with GreenEe2 shows the influence of material efficiency when the same trade balance is assumed. Here it becomes clear that in the long term in 2050 in particular less PV (-25 GW compared with GreenEe2) is needed to meet lower national direct electricity demand. The installed wind capacity is in the same range. Due to the fuel switch, gas plays a stronger role as a bridging technology in electricity generation in 2030 (+ 23 TWh), while the share of coal-based electricity is lower (-20 TWh). Both measures can save fossil raw materials in total.

Energy carriers are imported in the GreenMe scenario as well. However, these are no longer of fossil origin, but synthetic energy carriers produced based on renewable energies. They are used in application areas where direct use of electricity is not possible, including as a raw material for the chemical industry and in the transport sector (especially air and sea transport). A total of 480 TWh PtG/L is imported in 2050.

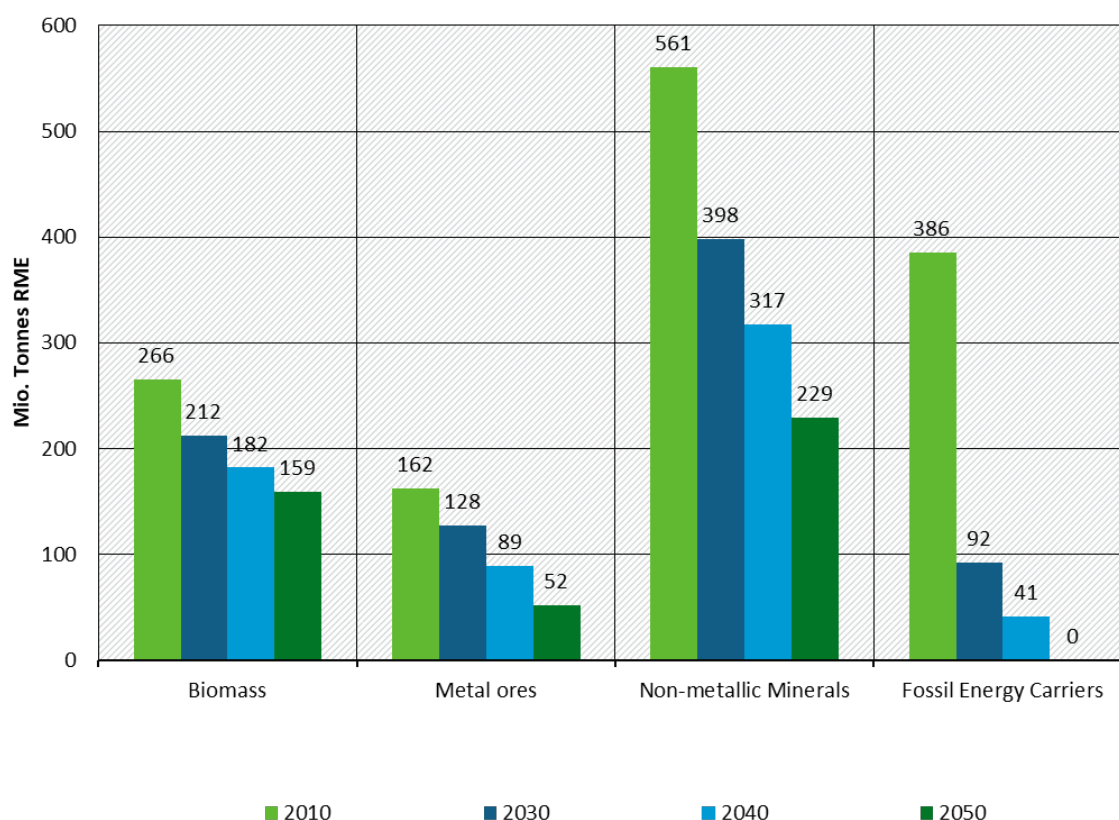
In the transport sector, total final energy consumption in 2050 is 284 TWh. Of this, 195 TWh is used for national transport and 89 TWh for international transport. Despite significant decreases, the highest consumption is still in motorised individual transport (94 TWh in 2050 vs. 384 TWh in 2010), followed by international air transport, which shows only a slight decrease. Final energy consumption in freight transport, road, rail and waterborne, falls sharply. In GreenMe, national transport requires 2 % [6 %] less final energy in 2030 [2050] than in GreenE2. The additional savings in 2050 are higher in freight transport (9 %) than in passenger transport (4 %). In international transport, the additionally assumed technical improvements, especially in maritime shipping, lead to final energy savings of 1% (2030) to 3 % (2050). While in passenger transport, only further efficiency improvements in drive technology were assumed,

in freight transport higher savings can be achieved by long term full electrification of overhead line trucks in addition to efficiency increases. Overall, in 2030 GreenMe requires about 2 % less fuel and 2 % less electricity than GreenEe2. In 2050, GreenMe uses 1 % less electricity, but fuel consumption is 12 % (national) and 8 % (national and international total) lower than in GreenEe2.

Raw materials

The transformation, including the material efficiency approaches adopted in GreenMe, leads to a 68% reduction in Raw Material Consumption (RMC) compared to 2010 to a total of 439.5 million tonnes of RME. The switch to renewable energy sources and the technologies for increased scrap recycling in the metal industry are making a significant contribution to the reduction in demand for primary raw materials. In 2050, the transformation in Germany and the rest of the world will mean that fossil raw materials will no longer be consumed. Furthermore, the decrease in the consumption of mineral raw materials (-60 %), which will be possible due to the decline in demand from the construction sector, but also due to the use of lightweight construction and timber construction methods, as well as a high level of recycling, should also be highlighted.

Figure Z- 7: Primary raw material consumption by material category in 2010, 2030, 2040 and 2050



Source: own illustration modelling results ifeu/IEE/SSG - URMOD

Total raw material productivity (final use/raw material input) increases by 3.1 % [3.0 %/3.8 %] annually on average between 2010 and 2030 [2030 to 2040 / 2040 to 2050]. In 2050, it is 537 index points higher than in 1994.

The consumption of primary raw materials by private households decreases to 191 million tons of RME by 2050. In 2050, food is the most raw material-intensive area of need with 97.0 million tons of RME, followed by leisure and tourism (36.2 million tons of RME) and housing and housekeeping (28.5 million tons of RME).

Between 2010 and 2050, cumulative consumption of primary raw materials sums up to a total of almost 36.7 billion tonnes of RME. Non-metallic minerals (46.3 %) account for the largest share, followed by biomass (25.3 %) and fossil raw materials (17.3 %).

Material recycling can save a total of (at least) 270 million tonnes of primary raw materials, which corresponds to a share of 38 % of total raw material consumption (primary and secondary).

Compared to the transformation in GreenEe2, the very resource-efficient transformation in GreenMe leads to a lower consumption of raw materials. In 2050, RMC is 16.3 % lower overall than in GreenEe2. The difference in 2050 is particularly pronounced for fossil raw materials and metal ores, partly due to the assumed technological changes in the rest of the world. The consumption of biomass is similar to that in GreenEe2. The effects - on the one hand an increasing efficiency of wood processing and on the other hand the substitution of abiotic by biotic materials - balance each other out in both scenarios. Domestic demand for wood changes in structure in comparison to today: On the one hand, primary wood is no longer used for energy purposes, and various sectors such as the paper or packaging industry demand fewer wood products. On the other hand, demand from the construction sector (structural and civil engineering) increases particularly strongly in GreenMe, with wood substituting abiotic raw materials. An important effect of this shift is the binding of CO₂ in the technosphere for several decades, which represents an additional sink of CO₂.

As a result of the lower RMC, the consumption of raw materials per person is 6.1 tonnes in 2050, 16.3 % lower than in GreenEe2. This is a reduction of 68 % compared to 2010 and about half of the current global average consumption. Food consumption accounts for the largest share of consumption in 2050, while raw material requirements for mobility, housing and leisure fall significantly. Despite the reduction in absolute quantities of raw materials, raw material requirements for the maintenance and renewal of existing buildings and infrastructure will remain comparatively high.

The demand for raw materials in GreenMe is lower than in the GreenEe scenarios for almost all metals under study. The exception is aluminium, which, according to the assumptions of the scenario, is in strong demand as a substitute for iron and copper, especially in 2030. The lower demand is particularly pronounced for technology metals such as silicon metal or silver, which are required to a lesser extent in material-saving and more durable technologies in GreenMe. Nevertheless, the demand for metals, such as lithium, required for new key technologies, is very high in all scenarios and thus also in GreenMe. GreenMe thus shows that the selection of resource-saving technologies can make an important contribution to reducing the demand for raw materials.

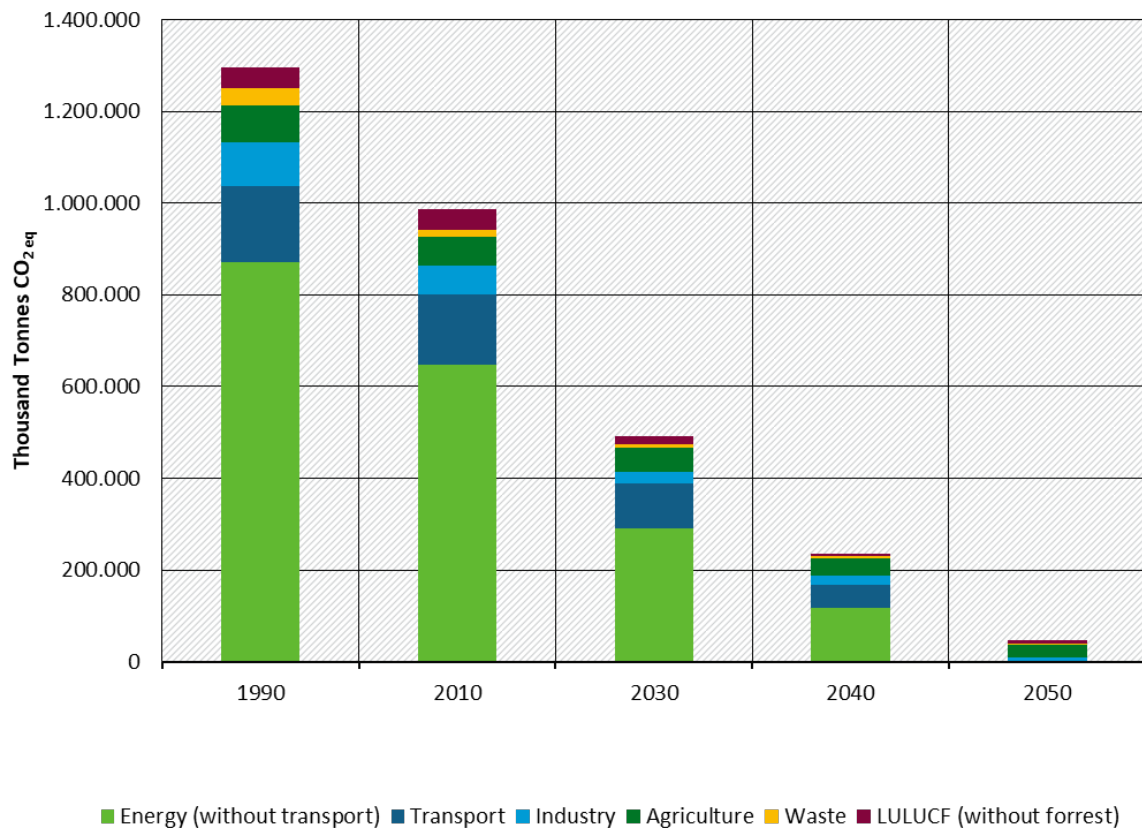
GHG emissions

In GreenMe, GHG emissions - calculated according to NIR - fall to 46.293 million t CO_{2eq} in 2050, a decrease of -96.4 % compared to 1990 (UBA 2019a). By 2030 [2040] the reduction in GHG emissions is -62.0 % [-81.8 %]. The largest reductions up to 2030 are in the waste management sector (-84.1 %). This contrasts with agriculture, where GHG emissions by 2030 are only 34.3 % lower than in 1990. In 2050, the energy sector, including transport, is greenhouse gas neutral and the reductions compared to 1990 are accordingly -100 %. GHG emissions from waste

management, LULUCF (without forestry) and industry also decrease sharply by 2050, with reductions of 92.4 %, 85.6 % and 89.2 % respectively. The smallest decreases are in the agriculture sector with only -66.8 %.

GHG emissions from international transport are indicated for informational purposes. GHG emissions from transport are made up of GHG emissions from international shipping and aviation. By 2030, these fall to 30.2 million tonnes of CO_{2eq}. In 2040 and 2050, international transport is entirely powered by synthetic renewable fuels and does not cause any greenhouse gas emissions on the balance sheet.

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



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

Process-related GHG emissions from industry total 10.4 million tonnes of CO_{2eq} in 2050, with reductions in all industrial sectors already during the period up to 2050. In 2050, GHG emissions from the cement industry dominate with 49.6 %, followed by the lime and glass industry (27 % and 4.2 %). The metal industry (excluding iron) and the foundry, textile, food and paper industries no longer emit GHG emissions in 2050. Fluorinated greenhouse gas emissions decrease to 1.2 million tonnes of CO_{2eq} by 2050. GHG emissions from solvents and other product applications total 0.76 million tonnes CO_{2eq} in 2050. In addition, nitrous oxide causes GHG emissions of 0.013 million tonnes CO_{2eq}.

GHG emissions from agriculture decrease by 66.8 % in 2050 compared to 1990, with the largest absolute decrease in emissions from livestock (-24.8 Mt CO_{2eq}) and the largest percentage decrease from changes in manure management (-90.8 %). GHG emissions in the waste sector fall to 2.9 million tonnes CO_{2eq} in 2050. About half of the GHG emissions in 2050 come from wastewater treatment plants. GHG emissions from LULUCF (excluding forests) decrease to 6.5

million tonnes CO_{2eq} in 2050. The remaining GHG emissions are caused by arable and grassland land and settlement areas.

Germany's cumulative GHG emissions (according to NIR) for the period between 1990 and 2016 add up to 28.96 billion t CO_{2eq}. By 2050, a further 14.72 billion t CO_{2eq} is added in the GreenMe scenario. The majority of 9.88 billion t is generated in the period up to 2030. 62.2 % of the cumulative GHG emissions between 1990 and 2050 are energy-related (excluding transport), 16.7 % are from transport. Industry accounts for 7.1 % and agriculture for 7.7 % of cumulative GHG emissions by 2050.

GHG emissions caused by German consumption are also declining. Private and public consumption as well as investments (final domestic use of Germany) cause only 35 [475/ 219] million t CO_{2eq} worldwide in 2050 [2030/2040], which corresponds to a decrease of -96.4 % compared to 2010 (calculated according to the UGR concept). In 2030 and 2040, energy-related GHG emissions dominate the emissions from final domestic use. Only in 2050, non-energy-related GHG emissions are higher than energy-related GHG emissions.

Higher material efficiency and a lower trade surplus lead to lower production volumes and thus to fewer greenhouse gas emissions compared to the GreenEe scenarios. In GreenMe, in 2050 [2030/2040], 4.6 % [8.1 %/14.3 %] less greenhouse gases (according to NIR) are emitted than in GreenEe1. The most relevant difference of 6.4 Mt CO_{2eq} in 2050 (14.3 Mt CO_{2eq} in 2030/15.2 Mt CO_{2eq} in 2040) is due to the reduction of the trade surplus. Higher material efficiency leads to a further decrease of 1.3 Mt CO_{2eq} in 2050 (1.7 Mt CO_{2eq} in 2030/2.3 Mt CO_{2eq} in 2040), particularly for non-energy GHG emissions in industry.

The GreenMe scenario shows that ambitious primary raw material savings, in addition to necessary technical and behavioural changes, can provide an important contribution to the additional reduction of greenhouse gas emissions. Einleitung

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 2019b). Zum Vergleich: die vorindustrielle Kohlendioxidkonzentration lag bei 280 ppm. Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits in der Gegenwart spürbar. Je höher die Konzentration von Kohlendioxid und weiterer Treibhausgase ansteigt, desto stärker wird sich das weltweite Klima und in Folge die Lebensbedingungen in nahezu allen Ökosystemen auf der Erde ändern.

Die Staatengemeinschaft, darunter Deutschland, bekennt sich mit dem Übereinkommen von Paris dazu, den Temperaturanstieg auf unter 2 Grad zu begrenzen. Dieser Anstieg bedeutet bereits, dass manche Ökosysteme wie Korallenriffe kaum noch eine Überlebenschance haben, Wetterextreme zunehmen und sich das Leben der Menschen weltweit anpassen muss. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, dass andere Ökosysteme wie tropische Regenwälder oder boreale Wälder überleben können und Kipppunkte, die zu sich selbst verstärkenden Prozessen der Klimaerwärmung führen, nicht überschritten werden. Mit einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf unter 2 Grad hofft man ebenso, dass die Anpassungsfähigkeit der Menschheit an die Veränderungen nicht überstrapaziert wird (UNFCCC 2015). Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 Grad beinhaltet, dass Deutschland den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant reduzieren und eine sogenannte Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitestgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden.

In den ersten 30 Jahren bis Ende 2019 konnten die Treibhausgasemissionen um 35,7 % gegenüber 1990 gesenkt werden, dies entspricht einer Emissionsreduktion von 447 Millionen Tonnen CO₂Äq in 2019 im Vergleich zu 1990 (UBA 2020). Wichtige Beiträge waren die Schließung von Kohlekraftwerken in der ehemaligen DDR und der Rückgang der Kohlenutzung im Zuge der Energiewende. In den anstehenden 30 Jahren bis 2050 müssen weitere 742 Millionen Tonnen Treibhausgase jährlich 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 Rohstoffe, um die neuen Techniken zu errichten. Je geringer die (zusätzliche) Gesamtnachfrage ausfällt, desto weniger Gründe für sektorale oder regionale Verteilungskonflikte und desto weniger (zusätzliche) Umweltbelastungen entstehen in Folge. Wie genau die Spielräume in Deutschland für eine Transformation zur Treibhausgasneutralität oder weitestgehenden Treibhausgasneutralität sind und welche Rohstoffe in welchem Ausmaß nachgefragt werden, das wurde im Projekt RESCUE untersucht.

Das Projekt RESCUE baut auf der Studie Treibhausgasneutrales Deutschland (UBA 2014) auf. Treibhausgasneutrales Deutschland beschreibt erstmalig, wie Deutschland in 2050 eine Treibhausgasreduzierung 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 – Material Efficiency, kurz: GreenMe.

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 GreenMe: Leitlinien und Ausrichtung

Wie alle Green-Szenarien beschreibt auch das GreenMe-Szenario einen Transformationspfad im Lösungsraum hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland in 2050. GreenMe steht für „Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Material efficiency“. Das Narrativ von GreenMe ist in UBA (2019a) ausführlich erläutert, im Folgenden werden die wesentlichen Leitlinien für das Verständnis dieses Berichts zusammengefasst.

GreenMe zeichnet sich 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 Materials substitutionen, und hierbei insbesondere die Substitutionen von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe. Relevante Umstellungen sind insbesondere im Bausektor spezifiziert. Es betrifft weiterhin diverse Ressourceneffizienzanstrengungen, die in einem höheren Umfang in Unternehmen in allen Sektoren, einschließlich Dienstleistungen, umgesetzt werden.

In GreenMe werden ferner ressourceneffizientere und langlebigere Technologien unterstellt. Wichtige Beispiele sind die Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Energien. Aber auch in anderen Sektoren wie beispielsweise in der Zementindustrie werden ressourceneffiziente Technologien spezifiziert.

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

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

GreenMe beschreibt somit im Vergleich zu anderen Green-Szenarien den Pfad mit den maximal technisch möglichen Änderungen. Die Ergebnisse quantifizieren die geringeren Energie- und Rohstoffbedarfe und die geringeren Treibhausgasemissionen, die sich zusätzlich zu ambitionierten Energieeffizienzanstrengungen aus einer ressourceneffizient-ambitionierten Umstellung ergeben.

1.3 Aufbau des Berichts

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

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

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

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

Im Kapitel 5 sind die Ergebnisse beschrieben. Zunächst wird die Energieversorgung dargestellt. Es folgen die aus den Annahmen resultierenden Treibhausgasemissionen, einschließlich der

vorgelagerten und der kumulierten Treibhausgasemissionen. Anschließend werden der gesamtwirtschaftliche Rohstoffverbrauch sowie die Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen beschrieben. Den Abschluss des Kapitels bildet die resultierende Flächennutzung.

Kapitel 6 zieht ein Resümee.

2 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen bei der Berechnung des GreenMe-Szenarios ist vergleichbar mit dem Vorgehen in GreenEe1, mit Ausnahme der Bestimmung der Outputmengen im Industriesektor, dies wird nach der Übersicht über das Vorgehen unten erläutert.

Die Berechnungen erfolgten im Rahmen eines Modellverbundes:

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

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

- ▶ Für die emissionsintensiven Industriesektoren Eisen/Stahl, NE-Metalle, Kalk, Zement, Nahrungsmittel, Holz/Papier, Chemie und Glas
- ▶ Für den Abfallbereich
- ▶ Für LULUCF (im Forstbereich 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 GreenMe 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 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 modelliert bzw. berechnet wurden. Diese Informationen flossen als Vorgaben in die Berechnung der Industrieoutputs in URMOD ein. Die Informationen zur Energie wurden in diesem ersten Schritt aus GreenEe1 übernommen. Ausgehend von dem Basismodell für das Jahr 2010 wurde in URMOD der Vektor für die Nachfrage durch 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 GreenMe Szenario konnte dagegen auf diese Anpassung an vorgegebene Output-Werte für die Industrie verzichtet werden.

Der nächste Schritt im Modellverbund folgt dem Vorgehen in GreenEe1: so wurden die THG-Emissionen der Quellgruppen Landwirtschaft, Industrie, Abfall und LULUCF ermittelt und auf der Basis des vorgegebenen Zielkorridors für das gesamte Treibhausgasemissionsbudget die noch möglichen zu emittierenden Treibhausgasemissionen im 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

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

3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz

Im GreenMe-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 (Rohstoffeinsatz pro Wertschöpfung) durchschnittlich um 1,2 % pro Jahr wächst. Der Unterschied zu den GreenEe-Szenarien (1,1 % p.a.) bzw. zur Steigerung in der Vergangenheit (+1 % p.a., strukturbereinigt) 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 Logistikoportimierungen bis hin zu Einsparungen und neuen Geschäftsmodellen reichen. Im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien, außer GreenSupreme, ist die Marktdurchdringung dieser Ressourceneffizienzmaßnahmen im GreenMe-Szenario höher.

Im GreenMe-Szenario werden im stärkeren Umfang als in den anderen Szenarien (Ausnahme GreenSupreme) Substitutionen von abiotischen Rohstoffen durch biotische Rohstoffe angenommen. Dies betrifft insbesondere den Hoch- und Tiefbau, die spezifischen Annahmen werden in Kapitel 0 und 4.7 erläutert. Ferner werden im GreenMe-Szenario Technologien unterstellt, die im Vergleich zu den Technologieannahmen in den anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenSupreme) materialeffizienter sind. Dies gilt insbesondere für Windkraftanlagen und Photovoltaik-Anlagen. Die Annahmen werden in Kapitel 4.8.2 beschrieben.

3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt

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

Für alle Länder außerhalb Europas wird abweichend zu den meisten anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenSupreme) 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 sehr umfangreichen 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 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 CO₂-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).

3.2 Emissionsziel 2030 und 2040

Die Treibhausgasminderungsziele in GreenMe sind in 2030 62 % und 2040 -82 % gegenüber 1990. In den Szenarien GreenLate und GreenEe1 wurden feste THG-Minderungsziele vorgegebenen. Konkret 2030 55 % bzw. 60 % und 2040 70 % und 80 %. In den Szenarien GreenMe, GreenEe2 und GreenLife ergibt sich durch die geänderten Annahmen zum internationalen Handel ein leicht höheres Ambitionsniveau.

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/PtL-Importe in 2030 und 2040 nicht auf nationale THG-Emissionsziele angerechnet. Für nähere Informationen siehe UBA (2019a).

4 Sektorale Annahmen

4.1 Landwirtschaft

Das GreenMe-Szenario hat zum Ziel, möglichst viele Rohstoffe einzusparen, wobei der Fokus auf technischen Ansätzen liegt. Dem Szenario liegt zunächst im Wesentlichen dasselbe Mengen- und Emissionsgerüst zugrunde wie den anderen Green-Szenarien (siehe Dittrich et al. 2020a). Im Detail sind die folgenden Annahmen hinterlegt, die auf UBA (2014) zurückgehen:

- ▶ **Flächenentwicklung:** Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird durch zwei Faktoren beeinflusst: der Flächenneuinanspruchnahme sowie der Wiedervernässung von Moorböden (siehe Kapitel 4.2). Insgesamt kommt es bis 2050 zu einem leichten Rückgang von Acker- und Grünlandflächen.
- ▶ **Technische Minderungsmaßnahmen:** Diese umfassen die Reduktion des Stickstoffdüngereinsatzes sowie Maßnahmen zum Wirtschaftsdüngermanagement. Durch die Erhöhung der Stickstoffeffizienz sowie die Erhöhung des Anteils des Ökolandbaus wird der Stickstoff-Gesamtüberschuss bis 2030 auf 50 kg N pro ha gesenkt. Außerdem wird ein steigender Anteil des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen vergoren, wobei die Gärreste gasdicht gelagert werden. Dies trägt zu einer starken Reduktion der THG-Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger bei.
- ▶ **Ökolandbau:** Gemäß dem Nachhaltigkeitsziel der Bundesregierung wird der Anteil bis 2050 des Ökolandbaus auf 20 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche kontinuierlich erhöht. Auf diesen Flächen wird kein mineralischer Stickstoffdünger verwendet.
- ▶ **Lebensmittelabfälle:** Eine Reduktion der Lebensmittelabfälle ist für die Landwirtschaftsemissionen nur dann relevant, wenn der Nachfragerückgang auf der Produktionsseite berücksichtigt wird. In allen Szenarien wurde eine kontinuierliche (lineare) Reduktion der Abfälle bis 2050 um 50 % unterstellt und die Produktion entsprechend angepasst.
- ▶ **Ernährung:** Derzeit liegt der Verzehr tierischer Produkte weit über den Verzehrempfehlungen der DGE. Gleichzeitig ist der Viehbestand der größte Emittent in der Landwirtschaft. In den Green-Szenarien wurde eine (lineare) Reduktion des Verzehrs hin zu den DGE-Empfehlungen angesetzt (genutzt wurde der Mittelwert von ca. 450 g Fleisch pro Woche). Eine Änderung der Ernährungsgewohnheiten hat allerdings nur dann einen Einfluss auf die THG-Emissionen, wenn entsprechend die Viehbestände angepasst werden.

Grundsätzlich sind auch in der Landwirtschaft verschiedene technische Maßnahmen denkbar, die im GreenMe-Szenario umgesetzt werden könnten, etwa den Einsatz von Nitrifikationshemmern oder Fütterungszusätzen, wie der sogenannten Methanpille (für eine nähere Beschreibung s. UBA (2019b)). Aufgrund der Unsicherheiten wird jedoch letztlich auf eine Modellierung beider Maßnahmen verzichtet.

Vielmehr wurde eine Anpassung der Viehbestände Zieljahr 2050 vorgenommen, basierend auf einer Anpassung des Selbstersorgungsgrads in der Fleischproduktion. Bereits im GreenEe-Szenario wurde eine ambitionierte Veränderung der Ernährungsweise und damit einhergehend

ein reduzierter Fleischkonsum mit abnehmenden Viehbeständen unterstellt. Dabei wird jedoch bei Fleisch immer noch ein Selbstversorgungsgrad von 345 % erreicht. Dies bedeutet, dass große Teile des produzierten Fleisches exportiert werden und dass eine Anpassung der Fleischnachfrage nicht unmittelbar in einer reduzierten Fleischproduktion und -verarbeitung resultiert. Im GreenMe-Szenario wird unter der Prämisse eines stärker ausgeglichenen internationalen Handels der Selbstversorgungsanteil bei tierischen Produkten auf 150 % festgelegt. Dies betreffen die Schweine- und Geflügelbestände. Die Rinderbestände werden nicht reduziert, da diese für die Deckung des heimischen Milchbedarfs notwendig sind und die Milchproduktion mit einer Mindestmenge an Fleischproduktion einhergeht. Das Verhältnis Milch- zu Fleischproduktion wird in den Green-Szenarien als fix angesetzt. Basierend auf dem THGND-Bericht (UBA 2014), wo eine optimierte Rinderhaltung (Verlängerung der Umtriebszeit, Umstieg von Färsen- auf Kälbermast, Zweinutzungsrasse) aufgezeigt wurde, wurden in den Green-Szenarien keine weiteren Einsparungen im Verhältnis Milch- zu Fleischproduktion mehr als realistisch erachtet. Der Milchkonsum wurde in allen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) mit der von der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) empfohlenen Untergrenze ab 2050 von 91,3 kg pro Kopf (Milch und Milcherzeugnisse) unterstellt.

Die resultierenden Produktionsmengen und Selbstversorgungsgrade in der tierischen Produktion sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Versorgungsbilanzen tierischer Produkte

[Mio t]	2010 GreenEe1 / THGND			2050 GreenEe1 / THGND			2050 GreenMe		
	Produktion	Nahrungsmittel	Selbstvers.	Produktion	Nahrungsmittel	Selbstvers.	Produktion	Nahrungsmittel	Selbstvers.
Fleisch gesamt	6,4	7,3	87,7 %	4,8	1,4	345 %	2,1	1,4	150 %
Rind	1,1	1	111 %	0,4	0,2	200 %	0,4	0,3	150 %
Schwein	4	4,5	90 %	3,3	0,9	367 %	1,3	0,9	150 %
Geflügel	1	1,5	65 %	1	0,3	333 %	0,4	0,3	150 %
Milch	28,1	23,5	120 %	18,3	17,2	106 %	18,3	17,2	106 %
Eier	0,8	0,8	100 %	0,8	0,6	132 %	0,8	0,6	132 %

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG - ALMOD

Die Entwicklung der Viehbestände im GreenMe-Szenario ist in Tabelle 5 zusammengefasst. Hinsichtlich der Pfadentwicklung werden die folgenden Annahmen unterstellt: bis 2030 erfolgt dieselbe Entwicklung wie im GreenEe1-Szenario (wo lediglich ein leichter Rückgang der Viehzahlen unterstellt wird), danach wird von einer linearen Abnahme bis 2050 ausgegangen.

Tabelle 5: Entwicklung der Viehbestände

Tierplatzzahlen [Mio.]	2010	2030	2040	2050
Milchkühe	4,18	3,75	2,97	2,18

Sonstige Rinder	8,63	8,10	5,02	1,92
Schweine	22,2	20,8	13,3	5,74
Geflügel	129	127	100	73,4
Schafe	2,39	2,20	1,50	0,79
Pferde	0,46	0,50	0,52	0,54

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG - ALMOD

Treibhausgasemissionsänderungen im Ackerbau ergeben sich aus der veränderten Menge an Wirtschaftsdünger. Des Weiteren kommt es durch den Abbau der Viehbestände zu einer Verringerung der Nachfrage nach Futtermitteln und damit zu freiwerdenden Ackerflächen in Höhe von ca. 1 Mio. ha. Die freiwerdenden Flächen können auf unterschiedliche Weise genutzt werden, etwa zum Ausgleich bei klimawandelbedingten Ertragsausfällen oder für Naturschutzmaßnahmen. Die sich daraus ergebenden Änderungen der THG-Emissionen werden im Modell nicht berücksichtigt.

Eine weitere Rückkopplung betrifft die Nahrungsmittelindustrie (s. Kapitel 4.3.9), wo die verringerten Viehbestände in 2050 zu einem geringeren Energiebedarf in der Fleischverarbeitung führen.

4.2 Flächennutzung und LULUCF (ohne Wald)

Die Flächenneuanspruchnahme ist im GreenMe-Szenario wie in allen Green-Szenarien rückläufig. In 2050 werden (netto) keine zusätzlichen Flächen für Siedlungen umgewandelt. In 2030 bzw. 2040 liegt der Wert bei insgesamt 20 bzw. 10 ha pro Tag. In die Berechnungen der Rohstoffaufwände ist zusätzlich eingeflossen, dass weiterhin räumliche Veränderungen stattfinden können und 7 ha pro Tag ent- und an anderer Stelle versiegelt werden können.

Die Annahmen im GreenMe-Szenario bezüglich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen entsprechen denen der GreenEe-Szenarien. So verläuft die Wiedervernässung von Mooren linear (5 % pro Jahr ab 2020) und ist 2040 abgeschlossen. 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 CO₂Aq.

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

4.3 Industrie

Für die Industrie unterstellen die meisten anderen Green-Szenarien (außer GreenLate) bereits hohe Materialeffizienzpotenziale, so dass für das GreenMe-Szenario mit diesem Schwerpunkt kaum Möglichkeiten bestehen über diese getroffenen technischen Annahmen hinauszugehen. Nur in wenigen Branchen sind darüber hinaus branchenspezifische Steigerungen der Materialeffizienz berücksichtigt. Wesentliche Treiber für Veränderungen sind allgemeine Annahmen zu Materialeffizienzsteigerungen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene, die sich auf die Produktionsmengen in den Industriebereichen auswirken. Das bedeutet, dass jegliche Entwicklungen in den Produktionsmengen nicht auf Einzelprognosen für die Branchen zurückzuführen sind, sondern sich aufgrund der gesamtwirtschaftlichen Annahmen und angenommenen Nachfrageentwicklungen ergeben. In GreenMe wurden die Produktionsmengen

der relevanten Basisindustrien modellendogen bestimmt. Während in GreenEe1 und GreenLate die Produktionsmengen vorgegeben waren und die produzierten Mengen, die aufgrund der sinkenden inländischen Nachfrage nicht im Inland gebraucht wurden, im Export verbucht wurden, wurden in GreenMe (ebenso GreenEe2, GreenLife und GreenSupreme) die Exportmengen entlang der sinkenden heimischen Nachfrage reduziert und darauf basierend die Produktionsmengen ermittelt.

4.3.1 Stahlindustrie

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

Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch (Für weitere Erläuterung (siehe Dittrich et al. 2020a)). Die absoluten Angaben und Werte für Material- und Energiebedarfe ändern sich entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen. In 2030-2040-2050 werden insgesamt 42,8 – 38,8 – 35,1 Mio. Tonnen Rohstahl erzeugt. Die technischen Annahmen sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Annahmen Stahlindustrie

Bereich	Annahmen
Technologieumbau	▶ Schrottanteil linearer Anstieg bis 2030 auf 56 %, 2040 auf 61 % und 2050 auf 67 % (entsprechend 25-27,5-30 Mio. t) ▶ linearer Rückbau der Oxygenstahlroute nach 2030 ▶ vor 2030 Reduktion der Oxygenstahlproduktion durch steigenden Schrotteinsatz über Elektrostahlroute (2030-2040-2050: 27,5-13,75-0 Mio. t Oxygenstahl) ▶ parallel linearer Aufbau von DRI-Anlagen (2030-2040-2050: 0-10-20 Mio. t DRI) mit Wasserstoff als Reduktionsmittel
spezifischer Endenergieverbrauch (EEV)	▶ Oxygenstahl: keine Änderung ▶ Elektrostahl: lineare Reduktion des spezifischen Strombedarfs um 20 %, umgekehrt Mehrbedarf wegen Verzicht auf Kohlenstaub (nach 2030) und der Umstellung auf reinen Strombetrieb ▶ Warmwalzwerk: lineare Reduktion des spezifischen Strombedarfs um 60 %, umgekehrt Mehrbedarf wegen Umstellung auf reinen Strombetrieb (induktive Erwärmung)
Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen	▶ lineare Reduktion Kohlenstaubeinsatz ▶ lineare Reduktion Graphitelektrodenverbrauch auf 3,6 kg CO₂/t Stahl ▶ durch Rückbau der Oxygenstahlroute bedingter Rückgang des Kalksteineinsatzes für Hochofen und Sinteranlage

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Stahlindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig reduziert. Die Änderungen der Produktionsmengen bewirken einen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien geringeren Endenergieverbrauch im GreenMe-Szenario, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 95,5 [130,8/109,6] TWh liegt. Der Anteil Strom liegt in denselben Jahren bei 95,5 [15,0/57,1] TWh.

4.3.2 Nicht-Eisen-Metallindustrie

Für die Nicht-Eisen (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 GreenMe werden die Produktionsmengen wie in den übrigen Green-Szenarien (außer GreenEe1 und GreenLate) modellendogen ermittelt und liegen bei 8,4 [7,6 / 8,0] Mio. Tonnen in 2050 [2030/2040]. Hieraus resultieren die wesentlichen Veränderungen in der NE-Metallindustrie anteilig bei der Umstellung auf strombetriebene Induktionsöfen, der Effizienzsteigerungen und der Steigerung der Sekundärerzeugung. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate identisch. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a). Die wesentlichen Annahmen sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Annahmen NE-Metallindustrie

Bereich	Annahmen
Sekundäranteil Kupfer, Aluminium, Blei und Zink	▶ 62 %-78 %-90 % (3,35 Mio. t in 2050)
Sekundäranteil sonstige Nicht-Eisen-Metalle	▶ Linearer Anstieg um 25 % bis 2050
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
Minderung prozessbedingter THG-Emissionen	▶ Umstellung auf inerte Anoden bei der Primäraluminiumerzeugung nach 2030: 63 % bis 2040, 100 % bis 2050 ▶ Kohlenstoff als Reduktionsmittel für Blei (Primär- und Sekundärerzeugung) und für Sekundärzinkerzeugung in 2050 aus importiertem C _{syn} (3,3 TWh)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Nicht-Eisen-Metallindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig reduziert. Die Änderungen der Produktionsmengen bewirken einen geringeren Endenergieverbrauch im GreenMe-Szenario im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 12,7 [18,3/15,1] TWh liegt. Der Stromanteil beträgt in denselben Jahren 8,6 [11,9/9,8] 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 Temporguss

(EST) und von 1,6 % p.a. für NE-Guss angenommen. In GreenMe wird die Produktionsmenge wie in den übrigen Green-Szenarien modellendogen ermittelt und beträgt 3,7 [4,6/4,1] Mio. Tonnen in 2050 [2030/2040]. Hieraus resultieren die wesentlichen Veränderungen in der Gießereiindustrie anteilig bei der 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. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a). Die wesentlichen Annahmen sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Annahmen Gießereiindustrie

GreenEe	GreenMe
Metallausbringung	► Steigerung auf 90 % in 2050 (Ausgangswert 65 %)
Technologieumbau	► Umstellung fossil befeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050
Endenergieverbrauch (EEV)	► Lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs auf 47 % des Ausgangswertes

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Gießereiindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Änderungen der Produktionsmengen bewirken einen geringeren Endenergieverbrauch im GreenMe-Szenario im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 3,4 [7,4/5,2] TWh liegt. Der Anteil Strom beträgt in denselben Jahren 3,4 [4,2/3,7] TWh.

4.3.4 Chemische Industrie

Für die chemische Industrie wurde ein im Vergleich zur restlichen industriellen Produktion ein 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 H₂ anstelle von H₂ 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 N₂O-Abscheidung in der Salpetersäure- und Adipinsäure-Herstellung (>98 % Abscheidung von N₂O)
- ▶ 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 2030/2040 produziert werden und die in 2050 noch in Nutzung ist bzw. thermisch verwertet wird, damit in 2050 keine zusätzlichen fossilen THG-Emissionen zu berechnen sind. Beispiel: Lebensdauer Baustoffe > 20 Jahre. Somit wird der gesamte Anteil Kunststoffe im Bau schon ab dem Jahr 2030 auf der Basis synthetischer Ausgangsstoffe hergestellt.

- ▶ Für das GreenMe-Szenario wurden die folgenden über die GreenEe-Szenarien hinaus gehenden Maßnahmen implementiert (s. Tabelle 9):
- ▶ Verwendung von Biomasse oder biogenen Reststoffen zur Herstellung von Industrieruß und Kunststoffen
- ▶ Einführung eines neuen Prozesses zur Herstellung von Adipinsäure: Oxidation von Butadien mit Kohlenmonoxid, dadurch intrinsische Vermeidung von THG-Emissionen des THG N₂O
- ▶ Der Energiebedarf des Chemie-Sektors steigt minimal an (+ 0.3 TWh in 2050) durch zusätzlichen Bedarf an Carbonfasern für die Herstellung von Faserbeton. Durch den neuen Prozess der Adipinsäure-Herstellung kann die THG-Emission des Chemie-Sektors komplett auf null gesenkt werden.

Tabelle 9: Annahmen chemische Industrie

	Annahmen
Ammoniak-Produktion	▶ Elektrolyse-H₂ statt Methan-Dampfreformierung ▶ 2040: 37,5 % Elektrolyse-H₂ ▶ 2050: 100 % Elektrolyse-H₂
Salpeter-/ Adipinsäure	▶ Umstellung Prozess auf CO als Oxidationsmittel (Butadien + 2 CO) ▶ 2030: 25 % ▶ 2040: 60 % ▶ 2050: 100 %
Industrieruß	▶ Umstellung auf erneuerbare Rohstoffe z.B. (Rest-)Holz oder PtL
Sonstige 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
Allgemeine Annahmen Chem. Industrie (indirekte THG-Emissionen)	▶ Steigende Energieeffizienz (1,5 %/a) ▶ PtG-Methan als Rohstoff ▶ H₂ aus Elektrolyse

Recycling von Kunststoffen

- Steigerung des werkstofflichen Recyclings (inkl. Pre-Consumer-Mengen) auf 58/66/75 % in 2030/2040/2050

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Chemischen Industrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Der Endenergieverbrauch im GreenMe-Szenario liegt im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 85,3 [142,7/105,4] TWh. Der Anteil Strom beträgt in denselben Jahren 54,5 [48,6/63,2] TWh. Hinzu kommt der Energieaufwand für die Produktion der Rohstoffe.

4.3.5 Zementindustrie

In der Zementindustrie erfolgt in den GreenEe-Szenarien ein Technologieumbau durch die Einführung von neuartigen zementähnlichen Bindemitteln, die nur 1/3 der prozessbedingten CO₂-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 unterstellt, um durch die vermehrte Klinkerproduktion anteilig die entstehenden Fehlmengen an Hüttensand aus der Stahlindustrie zu kompensieren. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a).

In GreenMe wird die Entwicklung der Produktion wie in den übrigen Green-Szenarien, außer GreenEe1 und GreenLate, modellendogen ermittelt und variieren entsprechend der charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Szenarien. So sinkt die Produktionsmenge der Zementindustrie gegenüber 2010 um 27 % bis 2030, um 36 % bis 2040 und um 44 % bis 2050 auf 22,2 – 19,7 – 17,2 Mio. Tonnen. Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 10.

Tabelle 10: Annahmen Zementindustrie im GreenMe-Szenario

Bereich	Annahmen
Klinkerfaktor	► Anstieg auf 0,9 zur Kompensation von Hüttensand (Ausgangswert 0,77)
Technologieumbau	► neuartige Bindemittel 50 % in 2050, davon 20 % in 2030 und 50 % bis 2040 ► rund 5 %igen Anteil durch den Einsatz von Faserbeton als Substitut für Stahlbeton
Brennstoffumstellung	► Kohle/Koks auf Gasfeuerung, 50 % bis 2030, 100 % bis 2040; lineare Reduktion EBS auf 0 % in 2050 zugunsten Gasfeuerung
Endenergieverbrauch (EEV)	► lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050 (Bezug Ausgangswert konventionelle Bindemittel): ► thermischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 10 % und neuartige Bindemittel um 50 % ► elektrischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 30 % und neuartige Bindemittel um 50 %

Prozessbedingte THG-Emissionen CO₂-Minderung

► erreicht durch die Einführung neuartiger Bindemittel, die den umgekehrten Anstieg durch den Anstieg des Klinkerfaktors überwiegen

Quelle: eigene Zusammenstellung

Für das GreenMe-Szenario werden darüber hinaus wenig weitere Steigerungsmöglichkeiten gesehen. Grundsätzlich sind die technischen Parameter im GreenMe-Szenario gegenüber dem GreenEe-Szenario unverändert. Eine weitergehende Steigerung der Materialeffizienz ist im GreenMe-Szenario durch alternative Betone einbezogen. So werden Faserbetone berücksichtigt, welche mit deutlich weniger Zement erzeugt werden können, da die bei einer Stahlbewehrung erforderlichen dickeren Zementschichten zum Korrosionsschutz nicht benötigt werden. Für das GreenMe-Szenario sind Glasfaser- und Carbonfaserbetone berücksichtigt. Carbonfaser wird bislang für Sanierungen eingesetzt, für den Neubau bisher eher Glasfaser, Kombinationen sind möglich. Derzeit sind die meisten Pilotprojekte auf Carbon-Basis, eine erste Zulassung für Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonfaser bewehrtem Beton wurde 2016 erteilt (Deutsches Zentrum Textilbeton 2018). Die meisten Zulassungen sind aber noch auf alkaliresistentem Glas (AR Glas), das billiger ist, aber nach Langzeiterfahrungen verliert Glasfaserbeton teilweise an Stabilität. Als Einsparpotenzial ist nach ersten Erfahrungen die Reduktion einer Betonstahlwand mittels Faserbeton von 10 cm auf 2 cm machbar (Klimm 2018).

Da es bisher nur wenig realisierte Anwendungen gibt und belastbare Aussagen zu einem allgemeinen Einsparpotenzial schwierig sind, wird für GreenMe das Einsparpotenzial je nach Anwendung konservativ zwischen 50 % und 60 % gesehen und im Mittelwert zu 55 % angesetzt. Das Substitutionspotenzial bezieht sich auf herkömmlichen Stahlbeton, dessen Mengen über den Pfad im GreenMe-Szenario rohstoffmodellendogen ermittelt sind. Die Substitutionsraten im Pfad sowie die Entwicklung der Materialkomponenten zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Bis 2030 wird von einem 10 %igen Substitutionspotenzial ausgegangen mit leichter Wachstumsdynamik bis 2050. 2030 überwiegt dabei noch die Substitution durch die länger etablierten Glasfaserbetone, deren Anteil über den Pfad durch eine gesteigerte Marktdurchdringung von Carbonfaserbeton rückläufig ist.

Die Substitution bezieht sich ausschließlich auf konventionelle Bindemittel, da für die neuartigen zementähnlichen Bindemittel die Anwendbarkeit nicht eingeschätzt werden kann. Die im GreenMe-Szenario resultierende ersetzte Stahlbetonmenge, die dadurch anteilig ersetzte konventionell erzeugte Zementmenge (Anteil 22 %) und die einzusetzenden Mengenteile an Glas- und Carbonfaser zeigt Tabelle 11. Die Herstellung und der Materialaufwand für die zusätzlich bereitzustellenden Glas- und Carbonfasern sind in der Glas- bzw. Chemieindustrie berücksichtigt.

Tabelle 11: Annahmen Faserbeton

Faserbeton	2030	2040	2050
Substitutionsrate Stahlbeton	10 %	15 %	20 %
davon Glasfasern	90 %	80 %	65 %
davon Carbonfaser	10 %	20 %	35 %

Tabelle 12: Ersetzte Mengen und Faserbedarf für Faserbeton

	2030	2040	2050
--	------	------	------

Ersetzter Stahlbeton [t]	4.546.667	5.100.000	4.100.000
Anteil ersetzter konventionell erzeugter Zement [t]	1.012.667	1.135.909	913.182
Glasfaserbedarf [t]	27.621	27.540	17.989

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Zementindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Änderung führen zu einem Endenergieverbrauch in Höhe von 12,2 [16,8/15,1] TWh im Jahr 2050 [2030/2040], der Anteil Strom liegt bei 3,2 [2,1/2,4] TWh in denselben Jahren.

4.3.6 Kalkindustrie

Für die Kalkindustrie ergibt sich ein kontinuierlicher Rückgang des Bedarfs an Branntkalk bedingt durch den Rückbau von Kohlekraftwerken und Oxygenstahlwerken. Der Bedarf an Dolomitskalk bleibt konstant. Die wesentlichen Veränderungen in der Kalkindustrie bestehen im Technologieumbau durch die Umstellung der Kohlefeuerung auf Gasfeuerung und durch Effizienzsteigerungen. Im Vergleich zu GreenEe1 sinken die Produktionsmengen auf 4,6 (2030), 4,1 (2040) bzw. 3,7 (2050) Mio. Tonnen.

Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a). Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13: Annahmen Kalkindustrie

Bereich	Annahmen
Technologieumbau	► Brennstoffumstellung von Kohle auf Gasfeuerung: 50 % bis 2030, 100 % bis 2040
Endenergieverbrauch (EEV)	► Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050: Brennstoff linear um 20 %, elektrisch linear um 10 %
Minderung prozessbedingte THG-Emissionen	► durch Rückgang Branntkalkproduktion (CO ₂ aus Entsäuerung)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Kalkindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Änderungen führen zu einem Endenergieverbrauch von 3,7 [5,1/4,4] TWh in 2050 [2030/2040], der Stromanteil beträgt 0,3 [0,4/0,4] TWh.

4.3.7 Glasindustrie

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

Für das GreenMe-Szenario werden darüber hinaus keine weiteren Steigerungsmöglichkeiten gesehen. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a). Die absoluten Angaben und Werte ändern sich entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten

Produktionsmengen, die in 2050 [2030/2040] 6,0 [6,8/6,4] Mio. Tonnen beträgt. Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 14.

Tabelle 14: 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
Minderung prozessbedingte THG-Emissionen	► durch Steigerung Scherbenanteil (weniger CO ₂ 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 Änderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen Endenergieverbrauch von 4,2 [16,7/9,3] TWh in 2050 [2030/2040], der Anteil Strom liegt bei 4,1 [8,7/4,6] TWh.

4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie

Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a). Dabei sind im Wesentlichen technische Ressourceneffizienzansätze umgesetzt. Dabei wurde eine starke Zunahme des Altpapieranteils von 73 % auf 83 % bis 2050 unterstellt. Für den spezifischen Energiebedarf wird ein Absinken von 3,1 MWh / t im Jahr 2010 auf 1,6 MWh / t im Jahr 2050 unterstellt.

4.3.9 Nahrungsmittelindustrie

Im GreenMe-Szenario wurden lediglich Anpassungen der Milch- und Fleischproduktion vorgenommen, um die Änderungen in der Landwirtschaft zu spiegeln (s. Kapitel 4.1). Dort kommt es durch eine Anpassung des Selbstversorgungsgrads zu einer starken Verringerung der Fleischproduktion auf 2,1 Mio. Tonnen in 2050 und zu einer Verringerung der Milchverarbeitung (18,9 Mio. Tonnen in 2050), was einen Rückgang des Energieverbrauchs für die Verarbeitung zur Folge hat. Diskutiert wurde eine Annahme zu alternativen Proteinquellen, aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit konnte die Annahme im GreenMe-Szenario jedoch nicht umgesetzt werden. Die restlichen Annahmen in der Nahrungsmittelindustrie bezüglich Produktionsmengen und Energieverbräuche sind identisch zu den anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenLate). Die Eckpunkte sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Annahmen Nahrungsmittelindustrie

Bereich	Annahmen
Umstellung der Energieträger auf Strom	► Reduktion des Energieträgereinsatzes bis 2030 um 30 % und Ersatz durch Strom ► Bis 2040 Ersatz von 70 %
Effizienzsteigerung	► Jährliches Wachstum um 0,7 %

- bis 2050 Effizienzsteigerung um Faktor zwei

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.3.10 Textilindustrie

In der Textilindustrie liegen die wesentlichen Transformationsschritte in der Umstellung von zunächst Kohle- und Ölfeuerung auf Gasfeuerung und im Weiteren auf elektrische Dampferzeugung sowie in der Steigerung der Energieeffizienz. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a). Für die Textilindustrie ist keine Produktionsmengenänderung quantifiziert worden, so dass die Produktion in allen Green-Szenarien identisch ist.

Tabelle 16: Annahmen Textilindustrie

Bereich	Annahmen
Technologieumbau	► Umstellung Kohle-, Ölfeuerung auf Gas bis 2030, Umstellung auf Strom zur Dampferzeugung 2030-2040-2050: 70 %-85 %-100 %
Endenergieverbrauch (EEV)	► Effizienzsteigerung um 50 % bis 2050: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050

Quelle: eigene Zusammenstellung

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 relevant¹:

- 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 GreenMe-Szenario bedingen die allgemeinen Annahmen zur Materialeffizienzsteigerung rückläufige Abfallmengen in manchen der Bereiche (Tabelle 17).

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

¹ Aus Abfallverbrennung werden für Deutschland keine nicht-energetischen THG-Emissionen berichtet.

Null reduziert wird und die korrelierenden Annahmen im Bereich Industrie, konkret chemische Industrie, getroffen werden.

Tabelle 17: Annahmen Abfall und Abwasser im GreenMe-Szenario

	GreenMe
Deponie	▶ Kontinuierliche Minderung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 gegenüber 1990 ▶ Rückbau und aerobe Stabilisierung bei 30 % der Ablagerungen
MBA/MBS	▶ ab 2020 kontinuierliche Umrüstung von MBA zu MBS-Anlagen ▶ kontinuierlich sinkende Abfallmenge zur Behandlung 2030-2040-2050: 98 %-97 %-96 % im Vergleich zu GreenEe
Kompostierung/-Vergärung	▶ ab 2020 gesteigerte getrennte Erfassung der Organikabfälle und ab 2020 kontinuierlich steigender Anteil zur Vergärung ▶ kontinuierlich sinkende Abfallmenge zur Behandlung 2030-2040-2050: 98 %-97 %-96 %
Abflusslose Gruben	▶ kontinuierliche Reduzierung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 durch Erhöhung des Anschlussgrades der Bevölkerung
Kläranlagen	▶ Reduzierung der Proteinaufnahme um 30% (von 36 auf 28 kg/E/a) bis 2050

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.5 Gebäude

4.5.1 Rahmenannahmen und Energienachfrage

Vor dem Hintergrund der charakteristischen Eigenschaften von GreenMe-Szenario resultieren keine spezifischen Annahmen hinsichtlich Endenergienachfrage und deren Versorgungsstruktur. Dementsprechend sind die Annahmen identisch zu den GreenEe-Szenarien. Wichtige Aspekte sind eine hohe Sanierungsrate und -tiefe über den Transformationspfad, ein sehr hoher energetischer Standard bei Neubauten sowie eine abnehmende Wohnfläche in Folge der Bevölkerungsentwicklung. Wesentliche Rahmenparameter sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: Wesentliche Rahmenparameter im Gebäudebereich

		2030	2040	2050
mittlere Sanierungsrate	% p.a.	0,024	0,031	0,034
mittlere Sanierungstiefe oder mittlerer Raumwärmebedarf	kWh/m²	52,6	32	25,6
mittlere Raumtemperatur	°C	19		
Neubaurate	(% der Wohnfläche pro Jahr)	0,7	0,5	0,4
Abgangsrate		0,56	0,72	0,91
Wohnfläche	m²	3,82 Mrd. m²	3,74 Mrd. m²	3,55 Mrd. m²

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.5.2 Entwicklung des Gebäudewärmeverbrauchs

Die mit Hilfe von GEMOD ermittelten Endenergiebedarfe sind in Tabelle 19 dargestellt. Für weitere Details wird auf den Bericht zu GreenEe verwiesen (siehe Dittrich et al. 2020a).

Tabelle 19: Nutz- und Endenergie der Wohn- und Nichtwohngebäude in 2030, 2040 und 2050 in TWh

		2030	2040	2050
Nutzenergie				
Wohngebäude	RW	280,4	194,4	120,5
	WW	53,1	47,1	40,1
Nichtwohngebäude	RW	144,3	81	62,3
	WW	11,8	10,3	8,7
davon GDH	RW	117,7	72,2	58,3
	WW	8,3	7,2	6,1
davon Industrie	RW	26,6	8,9	4
	WW	3,6	3,1	2,6
Endenergie				
Wohngebäude	RW	316,4	221,1	142
	WW	94,9	81,6	68
Nichtwohngebäude	RW	158	91,9	71,5
	WW	25,3	23,7	22,5
davon GDH	RW	128,3	80,4	65,4
	WW	17,5	16,4	15,9
davon Industrie	RW	29,8	11,5	6,1
	WW	7,8	7,3	6,6

Quelle: eigene Analysen ifeu/IEE/SSG – GEMOD

4.5.3 Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes

Die Restnutzungsdauern des heutigen, überalterten Heizungsanlagenbestandes sind in GreenMe identisch mit den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme von GreenLate. Auch die Marktanteile der Heizungstechniken beim Austausch von alten Heizungsanlagen verlaufen in GreenMe bis 2050 wie in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenLate). 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

Aufgrund der Charakteristik von GreenMe ergeben sich veränderte Annahmen im Rohbau im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenSupreme. Ausgehend von dem NA-RC-Szenario von (Deilmann et al. 2017), das auch in anderen Green-Szenarien genutzt wurde, wurden zusätzlichen Potenziale ermittelt, die im Folgenden beschreiben werden.

Die Substitution von abiotischen durch biotische Rohstoffe insbesondere im Gebäudebereich bietet viele Potenziale und Vorteile. So werden einerseits THG-Emissionen eingespart, weil weniger emissionsintensive Rohstoffe (insb. Stahl und Zement) genutzt werden, und andererseits wird im Holz gebundenes Kohlendioxid im anthropogenen Stock gebunden bzw. gelagert. Darauf aufbauend wird in GreenMe 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 GreenMe 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. Aufgrund der Feuchtigkeit kann Holz nicht in allen Bereichen als Substitut von mineralischen und Kunststoffdämmungen eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für Perimeterdämmungen, aber beispielsweise auch für Wäschereigebäude oder Schwimmbäder. Für Innen- und Außenwände, Dachflächen und Böden sind holzbasierte Dämmungen durchweg erprobt und verfügbar. In GreenMe wird daher angenommen, dass 20/50/70 % der Wohngebäude und 20/25/30 % der Nichtwohngebäude in 2030/2040/2050

mit holzbasierten Dämmstoffen gedämmt werden. Für diese Dämmstoffe können derzeitige Energieholzsortimente, insbesondere Laubholz minderer Qualität, verstärkt verwendet werden.

Im GreenMe-Szenario wurde zudem der Anteil von Leichtbauweisen erhöht. Leichtbauweisen finden sich bei Mauersteinen aus Kalksandstein, Ziegeln und Porenbeton. Rohstoffseitig interessant sind Leichtbauweisen, die zusätzlich die Dämmwirkung der Wände erhöhen und somit den Bedarf ergänzender Dämmung reduzieren. Allerdings stellen Leichtbausteine (insbesondere Porenbeton) oftmals höhere Anforderungen an das Recycling, gleichzeitig sind statische Anforderungen zu berücksichtigen. In GreenMe wurde auf Kalksandstein und Ziegelsteine fokussiert 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.

Im Unterschied zu den GreenEe-Szenarien wird im GreenMe-Szenario ferner unterstellt, dass vermehrt rohstoffsparende Fenster eingesetzt werden, die die gleiche Dämmleistung erbringen. Die in GreenEe1, GreenEe2 und GreenLife unterstellten dreifachverglasten Fenster stellen aufgrund ihres Gewichtes zusätzliche Anforderungen an Statik und Einbau. Hochisolierende Dünngläser existieren bereits, eine Restriktion stellen große Fensterflächen bzw. Sicherheitsauflagen dar (ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH 2013; Sack / Rose 2013). In GreenMe wird daher angenommen, dass ab 2030/2040/2050 neu installierte Fenster zu 50/75/100 % durch materialeffiziente Dünnglasfenster ersetzt werden. Die Materialkennndaten sind (ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH 2013) entnommen.

Eine weitere Annahme in GreenMe betrifft die elektrischen Leitungen im Gebäudebereich. Diese bestehen normalerweise aus Kupfer. Das aus Materialsicht günstigere Aluminium ist gegenwärtig nicht zugelassen, da Aluminium spröder ist und nach mehrmaligem Biegen brechen kann, wodurch sich die Brandgefahr erhöht. In GreenMe wurde, unter der Annahme, dass Leitungen sachgerecht und ohne Bruch verlegt werden, eine Substitutionsrate der elektrischen Kabel im Neubau von 20/50/100 % in den Jahren 2030/2040/2050 unterstellt. Die geringere Leitfähigkeit wurde durch eine höhere Dicke ausgeglichen (vgl. Kap. 4.7.4).

Ferner wurden weitere Recyclingpotenziale im Hochbau geprüft. Da jedoch die in den GreenEe-Szenarien und GreenLife angenommenen Potenziale bereits sehr ambitioniert sind, wurde auf eine weitere Erhöhung der Nutzung von Recyclingbaustoffen im Hochbau abgesehen.

4.6 Verkehr

4.6.1 Vermeidung und Verlagerung im nationalen Personenverkehr

Die Verkehrsentwicklungen im Personenverkehr sind in GreenMe sowohl hinsichtlich der Gesamtverkehrsnachfrage als auch beim Modal-Split identisch zu GreenEe1 und GreenEe2. Tabelle 20 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Personenverkehr in GreenEe2 und GreenMe. Bis zum Jahr 2030 sinkt die Verkehrsleistung im motorisierten Individualverkehr um 10 % gegenüber dem Ausgangspunkt 2010, gleichzeitig steigt der öffentliche Verkehr um 39 % sowie der Rad- und Fußverkehr um 9 %. Der nationale Flugverkehr wächst um 12 %. Bis zum Jahr 2050 verstärkt sich die Abnahme im motorisierten Individualverkehr deutlich (-35 % ggü. 2010), während die Verkehrsleistungen der übrigen Verkehrsmittel leicht weiter steigen. Insgesamt ist die nationale Personenverkehrsleistung im Jahr 2050 um 18 % niedriger als im Ausgangspunkt 2010.

Tabelle 20: Nationale Personenverkehrsleistungen in den GreenEe-Szenarien und in GreenMe

Mrd. Pkm	MIV Alltag	MIV Fern	ÖPNV	ÖPFV	Rad/Fuß	Flug national	National Gesamt
2010	479	423	88	96	67	10	1.164
2030	431	381	121	135	73	12	1.153
2050	312	277	132	139	79	12	950

Quelle: eigene Analysen ifeu - TREMOD

4.6.2 Entwicklung der Pkw-Flotten

Da die angenommene Verkehrsleistungsentwicklung sowie die Annahmen zu den jährlichen Pkw-Neuzulassungen wurde in GreenMe identisch zu den der GreenEe-Szenarien unterstellt. Bis 2050 sinkt die Zahl der Pkw-Neuzulassungen auf 2 Mio. pro Jahr. Auch der Markthochlauf von Elektro-Pkw ist in GreenMe unverändert gegenüber den GreenEe-Szenarien. Bis zum Jahr 2030 werden im Pkw-Bestand etwa 7,5 Mio. Elektro-Pkw erreicht (Neuzulassungsanteil ca. 40 %), ab 2040 werden ausschließlich Elektro-Pkw neu zugelassen. Unterschiede zu den GreenEe-Szenarien betreffen zum einen die eingesetzten Akkutechnologien und -größen, zum anderen der unterstellte verstärkte Leichtbau.

Akkutechnologien und -größen: In den GreenEe-Szenarien werden 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 in GreenMe sind nach derzeitigem wissenschaftlichem Stand nicht absehbar. Gleichzeitig wurden in den GreenEe-Szenarien 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 GreenMe 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 in GreenMe die Reichweiten ggü. den GreenEe-Szenarien je nach Fahrzeuggröße und -konzept um etwa 10-30 % reduziert. Tabelle 21 stellt die angenommenen Reichweiten neu zugelassener Elektro-Pkw gegenüber.

Tabelle 21: Annahmen zu Reichweiten neu zugelassener Elektro-Pkw in GreenMe und den GreenEe-Szenarien

		GreenEe1 und GreenEe2		GreenMe	
		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
	Pkw klein	150 km	300 km	150 km	200 km
PHEV	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 GreenMe 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 GreenEe-Szenarien wurden konstruktive Leichtbauvarianten (z.B. die Materialeinsparung durch optimierte Bauweise und Einsatz hochfester Stähle) sowie Substitution von Stahl durch Aluminiumwerkstoffe angenommen. Darüber hinaus gehende Leichtbaupotenziale bieten sich durch den Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK). Für GreenMe wird nun einerseits eine schnellere Einführung von Aluminiumleichtbau und andererseits auch CFK-Leichtbau angesetzt. Dabei wird unterstellt, dass bis 2050 ein funktionierendes Recycling aufgebaut wird. Der zusätzliche Leichtbau führt je nach Pkw-Größe und Antriebskonzept zu etwa 3-5 % zusätzlichen Effizienzverbesserungen in GreenMe gegenüber den GreenEe-Szenarien². Die nachfolgende Tabelle 22 zeigt die Anteile verschiedener Leichtbauausprägungen an den Pkw-Neuzulassungen bis zum Jahr 2050.

Tabelle 22: Leichtbauvarianten neu zugelassener Elektro-Pkw in GreenMe und den GreenEe-Szenarien

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

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.6.3 Verlagerung im nationalen Güterverkehr

Die Entwicklung der zukünftigen Güterverkehrsnachfrage in den Green-Szenarien soll die Änderungen der Wirtschaftsentwicklung und Produktionsstrukturen in Deutschland (Güteraufkommen in Produktion, Import und Export) und damit verbundene Änderungen der Transportnachfrage widerspiegeln. Dazu wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, der auf den in URMOD abgeleiteten Rohstoffmengen für die Produktion von Gütern basiert. Damit wird gewährleistet, dass die Wechselwirkungen zwischen Produktion und Gütertransport abgebildet

² 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.

und die Szenarien in sich konsistent sind. Bei der exogenen Verwendung bspw. des Bundesverkehrswegeplans (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 nur die Verkehrsmittelwahl und somit den Modal-Split der Verkehrsleistungen im Güterverkehr. Hier wurden in GreenMe 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 im Klimaschutzszenario in (UBA 2016a) angenommen. Die Differenz der Bahn- und Binnenschifftransporte zur Gesamttransportnachfrage pro Hauptverkehrsbeziehung und Güterabteilung wird als Lkw-Transporte gerechnet.

Tabelle 23 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Güterverkehr in GreenMe und GreenEe2. Insgesamt sind in GreenMe die Verkehrsleistungen im Jahr 2050 um ca. 4 % niedriger als in GreenEe2. Während der Straßengüterverkehr etwa 7 % niedriger ist, sind die Verkehrsleistungen im Schienen- und Binnenschifftransport etwa genauso hoch wie in GreenEe2.

Tabelle 23: Nationale Güterverkehrsleistungen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

Mrd. tkm		Straße	Schiene	Wasser	National Gesamt
2030	GreenEe2	415	171	71	656
	GreenMe	409	171	70	651
2050	GreenEe2	384	211	74	669
	GreenMe	357	210	73	639

Quelle: eigene Analysen ifeu

4.6.4 Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr

In GreenMe werden im Wesentlichen die gleichen Annahmen zu den Entwicklungen der Fahrzeugflotten im Güterverkehr getroffen wie in den anderen GreenEe-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). Darüberhinausgehende Leichtbauvarianten werden, auch wegen der sehr geringen Auswirkungen auf den gesamten Materialbedarf, in GreenMe nicht vorgesehen.

Unterschiede gibt es bei Oberleitungs-Lkw: In den GreenEe-Szenarien wurden Oberleitungs-Lkw in allen Jahren ausschließlich mit Dieselhybrid-Technologie angenommen. In GreenMe sind im Jahr 2030 neu zugelassene OH-Lkw ebenfalls Dieselhybride. Bis 2050 verschieben sich die Neuzulassungen hin zu vollelektrischen Antrieben, wie in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Anteile vollelektrischer Oberleitungs-Lkw an den Neuzulassungen in GreenMe

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

Quelle: eigene Analysen, ifeu

Die Verschiebung zu vollelektrischen Oberleitungs-Lkw führt zu einem erhöhten Rohstoffbedarf für die Fahrzeugherstellung auf Grund der benötigten 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 methodisch in den Szenarien nicht vollständig abbilden.

4.6.5 Internationaler Verkehr

Im internationalen Flugverkehr wurden in GreenMe identische Annahmen zur Verkehrsentwicklungen und Effizienzsteigerungen wie in den beiden GreenEe-Szenarien getroffen. Trotz Klimaschutzanstrengungen ist die Verkehrsleistung im Jahr 2050 etwa doppelt so hoch wie 2010. Die angenommene Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs pro Verkehrsleistung zwischen 2010 und 2050 um etwa 56 % entspricht 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 Green-Szenarien einheitlich, es gibt keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung. Die Energieeffizienz von Seeschiffen verbessert sich in den GreenEe-Szenarien angelehnt an (UBA 2016b) zwischen 2010 und 2050 um ca. 53 %. In GreenMe wird im gleichen Zeitraum 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, was dem Grundgedanken von GreenMe entspricht, dagegen sind Maßnahmen wie slow-steaming oder LNG nicht enthalten.

4.7 Weitere Sektoren

4.7.1 Sonstige THG-Emissionen

Ausgehend von GreenEe1 wurden die THG-Emissionen der F-Gase und Lösemittel sowie sonstige THG-Emissionen wie folgt variiert:

- ▶ Kopplung der sonstigen THG-Emissionen 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, u.ä.)
- ▶ Kopplung der THG-Emissionen durch die Anwendungen 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, da die Quellen zu divers sind. Unverändert blieben die Annahmen zu Feuerlöschmitteln, Lachgas, Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen sowie die Annahmen zur Herstellung von Dämmstoffen.

4.7.2 Sonstige Branchen

Es wurde angenommen, dass die sonstige Endenergienachfrage der übrigen Sektoren (sonstige Industrie sowie Handel und Dienstleistungen) 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. Darüber hinaus wurde eine Recyclingquote von 50 % bei Altholz angenommen.

4.7.3 Tiefbau

Die Annahmen zum Straßenbau einschließlich der Ingenieurbauwerke (Tunnel und Brücken) sind identisch zu den Annahmen in GreenEe1 und GreenEe2. Auch die Annahmen zu den Rohstoffaufwendungen im Schienen- und Gleisbau sowie zu kommunalen Infrastrukturen außer den nachfolgend Genannten wurde aus GreenEe1 bzw. GreenEe2 übernommen (siehe Dittrich et al. 2020a). Zusätzlich wird angenommen, dass sich Recyclingtechnologien verbessern, konkret wurde eine höhere Recyclingquote von 75 % (2030), 80 % (2040) und 90 % (2050) bei der Erneuerung von ungebunden 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 Stromnetze

In GreenMe wurden die Annahmen zum Materialbedarfs für die Stromnetze variiert. Wie in allen Green-Szenarien 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 (Kap. 4.2) 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 ($\text{Trassenlänge} \cdot 3 = \text{Stromkreislänge}$). 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.

Freileitungen sind aufgrund der Aufwendungen für Bettungssande weniger materialintensiv als Erdkabel. Daher wird im Gegensatz zu den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme GreenSupreme) in GreenMe 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, Tabelle 25 zeigt Kennzahlen zu Kupfer und Aluminium im Vergleich. 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. Aluminium weist mit 2,71 kg/dm³ eine deutlich geringere Dichte als Kupfer auf. Trotz des größeren Leiterquerschnitts sind somit Aluminiumleitungen bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit etwa halb so schwer wie eine vergleichbare Kupferleitung.

Tabelle 25: Technische Basisdaten für den Vergleich zwischen Kupfer und Aluminium

Eigenschaft	Einheit	Kupfer	Aluminium
elektrische Leitfähigkeit	m/Ω mm ²	58,0 je 106	36,6 je 106
Leitungsquerschnitt	mm ²	1,5	2,5
Dichte	kg/dm ³	8,9	2,7

Quelle: eigene Zusammenstellung

Darauf basierend wird in GreenMe der Anteil von Aluminium bei den Freileitungen höher unterstellt. Abseits des Forschungsbedarfs zur geringen Kriechfestigkeit von Alu-Leitern bei hohen Temperaturen liegen uns keine Informationen zu grundsätzlichen technischen Einschränkungen bei Stromleitungen vor (Forschung Stromnetze o.J.). Tabelle 26 zeigt eine Übersicht der getroffenen Annahmen zur Aufteilung von kupfer- und aluminiumbasierten Leitungen/Kabeln.

Tabelle 26: Annahmen zur Aufteilung Kupfer- und Aluminiumbasierte Leitungen/Kabel in Prozent

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 wurde auch die Möglichkeit der Substitution von Kupferfahrdrähten geprüft. Bereits mehrmals wurde in der Vergangenheit, insbesondere zu Zeiten von Rohstoffknappheiten und hoher Preise, versucht den Fahrdraht von Eisenbahnen durch Aluminium- bzw. Stahlmaterialkombinationen zu ersetzen. Korrosion, Bruchanfälligkeit und anderes führten aber dazu, dass keine der eingesetzten Materialien auf Dauer überzeugen konnten. Aus dem Grund wurden in allen Green-Szenarien identische Annahmen der Materialwahl bei den Oberleitungen für Bahn und Oberleitungs-LKW unterstellt.

4.8 Energieversorgung

4.8.1 Festlegung verschiedener Parameter

Die grundsätzlichen Maßnahmen und Stellschrauben im Bereich der Energieversorgung in GreenMe sind im Folgenden denen der GreenEe-Szenarien gegenübergestellt (Tabelle 27). Dabei ist besonders hervorzuheben, dass bereits 2030 mehr Gaskraftwerke gegenüber Kohle eingesetzt werden, und dass der Anteil von PV gegenüber Windenergie Onshore etwas reduziert wird. Die technischen Parameter sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020a) dargestellt. Der Stromaustausch in Europa wurde in allen Szenarien einheitlich mit einem bilanziellen Jahressaldo von „Null“ für den deutschen Im- und Export abgebildet.

Tabelle 27: Überblick zu den Annahmen in der Energieversorgung in GreenMe im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe1 und 2	GreenMe
Kohlekraftwerke Lebensdauer	▶ Braunkohle 30 Jahre ▶ Steinkohle 40 Jahre ▶ Ab 2040 keine Kohle	
Merit-Order fossile Kraftwerke	▶ 2030 Kohle vor Gas (niedrigerer CO₂-Preis im ETS) ▶ 2040 keine Beeinflussung der Merit-Order (fuel switch)	▶ keine Beeinflussung der Merit-Order (fuel switch): Es werden auch im Jahr 2030 schon mehr Gaskraftwerke eingesetzt
EE-Potentiale & Markthochlauf	▶ Mindestleistung Offshore langfristig 32 GW ▶ 2050 freier Zubau von Wind onshore und PV ▶ daraus abgeleitet für 2030 und 2040 Korridor mit 0 % Überbauung³	
Verhältnis PV-Freiflächen/PV-Dachflächen	▶ 50 % Freiflächenanlagen ▶ 50 % Dachflächenanlagen	▶ 25 % Freiflächenanlagen ▶ 75 % Dachflächenanlagen
Batteriespeicher	▶ First life	▶ Second life

³ Überbauung ist die Erhöhung der jährlichen Installationsrate im Zeitraum Heute bis 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, ...).

Überbauung der langfristigen Repoweringrate WEA	▶ Keine Überbauung ▶ mit 30 %/a Marktwachstum
Überbauung der langfristigen Repoweringrate PV	▶ Keine Überbauung ▶ mit 50 %/a Marktwachstum
PtG/L-Importe	▶ 15 % Überbauung ▶ Preis: 2030: 154,3 €/MWh, 2040: 136,2 €/MWh, 2050: 118,2 €/MWh ▶ Preise identisch für alle Szenarien ▶ 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)

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.8.2 Technologieannahmen für Photovoltaik- und Windenergieanlagen

Für die Modellierung der Energieerzeugung aus Photovoltaik (PV) werden verschiedene Technologien auf Dachflächen und Freiflächen unterschieden. Hintergrund dieser Unterscheidung ist der unterschiedliche Materialbedarf der Befestigungsstruktur (Aufständigung). Während in GreenEe angenommen wurde, dass Dach- und Freiflächen-PV-Anlagen gleich verteilt sind, liegt das Verhältnis in GreenMe bei 25 % Freiflächenanlagen und 75 % Dachflächenanlagen. 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 wesentliche Vorteil der Dünnschichtzellen liegt im geringen Materialeinsatz und aufgrund der Möglichkeit der großflächigen Beschichtung auch einfacheren Produktionstechnik (BINE Informationsdienst 2011). 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). Die PV-Berechnung besteht somit aus den folgenden Datensätzen, die aus EcoInvent entnommen sind: (1) photovoltaic laminate production, a-Si, (2) photovoltaic panel production, a-Si und (3) photovoltaic slanted-roof installation, 3kWp, a-Si, panel.

Für Freiflächen ab 2030 werden bifaziale Dickschichtzellen angenommen. Neben dem direkt einfallenden Sonnenlicht an der Vorderseite des Moduls nutzen bifaziale Photovoltaikmodule auch das durch die Umgebung auf der Rückseite des Moduls reflektierte Licht zur Stromerzeugung (BINE Informationsdienst 2018). Der Wirkungsgrad der bifazialen PV wird mit 23,1 % Wirkungsgrad 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.

Aufgrund der fehlenden LCI-Daten für in der Entwicklung stehende Technologien erfolgt die Berechnung des Rohstoffaufwandes auf Basis der Referenzanlage für Dickschicht-PV. Dazu werden die Annahmen der Wafer- und Zellenproduktion angepasst, da gegenüber den

klassischen Dickschicht-PV bei bifaziale Zellen eine doppelseitige Einstrahlung vorherrscht. Betroffen ist dadurch auch ein höherer Bedarf an Glas für die rückseitige Einstrahlung.

Für die Batteriespeicher wird im Gegensatz zu GreenEe eine Nutzung von Second-Life-Batterien nach einer Nutzung in der Elektromobilität unterstellt. Dies hat jedoch nur Auswirkungen auf die Ressourcenberechnung in URMOD, nicht jedoch auf die Annahmen zur Wirtschaftlichkeit oder Effizienz in SCOPE.

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. Der Materialaufwand der WEA wird durch Skalierung ausgehend von einer 2,3 MW Onshore-WEA (wind turbine construction, 2.3MW, precast concrete tower, onshore) (Treuer 2014) modelliert. Der Materialaufwand der Windenergieanlagen für die abgestimmten Dimensionen und der Leistung werden abgeleitet aus den Arbeiten (Caduff et al. 2012) berechnet. Die Generatorentechnik entspricht den Annahmen in GreenEe (fremderregte Generatoren). 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. Der Materialaufwand der WEA wird ausgehend von einer 2 MW Offshore-WEA (Treuer 2010a; b) und abgeleitet aus den Arbeiten von (Caduff et al. 2012) skaliert. Für die Ermittlung der Rohstoffaufwendungen wird angenommen, dass ab 2025 die Hälfte aller WEA-Anlagen und ab 2030 ausschließlich 12 MW Anlagen gebaut werden. Diese haben eine Nabenhöhe von 120m und einen Rotordurchmesser von 200 m, unterstellt werden ferner permanent erregte, synchrone Generatoren mit Getriebe. 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 aufgrund der Langlebigkeit der Module ohne eine Überbauung (maximaler jährlicher Absatzmarkt vor 2050 gegenüber der langfristigen Repoweringrate nach 2050) geringere Freiheitsgrade auf. Die Ausprägung in 2030 und 2040 im Ausbaukorridor wird dabei durch das THG-Emissionsziel bestimmt und weist dabei nur bei Wind-Onshore große Freiheitsgrade auf.

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. Wie in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme GreenSupreme und GreenLate) liegt die Überbauungsrate bei nur 15 %, da schon durch eine moderate Überbauung die Notwendigkeit des Marktzuwachses in der ersten Dekade 2020 bis 2030 deutlich reduziert werden kann.

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

4.8.5 Herkömmlicher Stromverbrauch

Die Entwicklung des klassischen Stromverbrauchs ohne neue Sektorkopplungs-Anwendungen ist in folgender Tabelle 28 für GreenMe absolute und relativ im Vergleich zu GreenEe2 dargestellt.

Tabelle 28: Klassischer Stromverbrauch GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

TWh/a		2030	2040	2050	2030 reaktiv zu GreenEe2	2040 reaktiv zu GreenEe2	2050 reaktiv zu GreenEe2
Industrie	Prozesswärme- monovalent	61,1	71,1	83,1	99,1 %	98,9 %	100,1 %
	Klimakälte	3,2	2,1	0,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	3,1	2,1	1,0	97,4 %	97,0 %	95,8 %
	Mechanische Energie	68,9	57,2	47,6	102,3 %	102,3 %	100,1 %
	IKT	8,9	8,9	8,2	97,4 %	97,0 %	95,8 %
	Beleuchtung	8,6	7,0	5,4	100,0 %	100,0 %	100,0 %
GHD	Prozesswärme- monovalent	8,1	8,0	8,0	97,5 %	97,2 %	96,3 %
	Klimakälte	5,3	7,7	10,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	14,1	15,7	17,4	97,6 %	97,5 %	96,3 %
	Mechanische Energie	29,1	22,1	15,2	98,1 %	99,1 %	99,9 %
	IKT	22,9	22,0	21,0	97,6 %	97,5 %	96,3 %
	Beleuchtung	41,4	29,9	18,3	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Haus- halte	Mechanische Energie	4,3	4,0	3,6	95,8 %	89,8 %	83,5 %
	Beleuchtung	8,0	4,9	1,8	95,8 %	89,8 %	83,5 %
	PW, Kälte, IKT	81,7	72,6	63,5	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Gebäudewärme NSH/TWW		13,7	6,7	3,6	100 %	100,0 %	100,0 %
Verkehr - Schiene		14,0	14,6	15,2	104,0 %	107,5 %	110,3 %
Umwandlungsverbrauch		7,0	4,0	3,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Leitungsverluste		28,0	30,7	33,0	96,4 %	96,2 %	97,0 %

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von 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. Die Stromerzeugung und Biomethaneinspeisung in GreenMe fällt etwa in der gleichen Höhe wie in GreenEe2 aus.

Tabelle 29: Stromerzeugung in GreenMe

TWh		Strom aus Biogas	Davon Strom aus Gülle	Davon Strom aus NaWaRo	Davon Strom aus Klärgas	Davon Strom aus Abfall
2030	GreenEe2 und GreenMe	10,01	6,11	2,70	0,76	0,44
2040	GreenEe2 und GreenMe	8,03	6,90	0,00	0,80	0,33
2050	GreenEe2 und GreenMe	6,53	5,25	0,00	0,90	0,38

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

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

Tabelle 30: 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 Green-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 Altholzpotenziale in der Industrie eingesetzt, dadurch können dort 34 TWh Wärme auf einem Temperaturniveau bis 500°C bereitgestellt werden, Aber auch hier gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen GreenEe2 und GreenMe.

Tabelle 31: Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industriellen Reststoffen) in GreenMe 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	
	GreenMe	10,01	49,69	9,91				
2040	GreenEe2	8,03	45,86	0,84	5,36	16,80	8,40	8,40
	GreenMe	8,03	45,86	0,84				
2050	GreenEe2	6,53	33,80	0,00	5,944	17,68		17,68
	GreenMe	6,53						

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 (Steigerung 1,04) gegenüber GreenEe abgeleitet. Die Szenarioannahmen sind GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020a) dargestellt. In Summe ergibt sich eine etwas 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 32: Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenMe im Vergleich mit GreenEe

	2030		2040		2050	
	GreenEe1/2	GreenMe	GreenEe1/2	GreenMe	GreenEe1/2	GreenMe
Stromerzeugung (netto) [TWh _{el}]	5,30	4,77	4,40	4,27	3,60	3,46
Wärmeerzeugung (Fernwärme) [TWh _{th}]	5,83	5,72	5,00	4,85	4,17	4,00
Emissionen [Mio. t CO ₂ Äq]	17,4	17,05	13,6	13,19	0	0

Quelle: eigene Annahmen UBA, ifeu, IEE

5 Ergebnisse

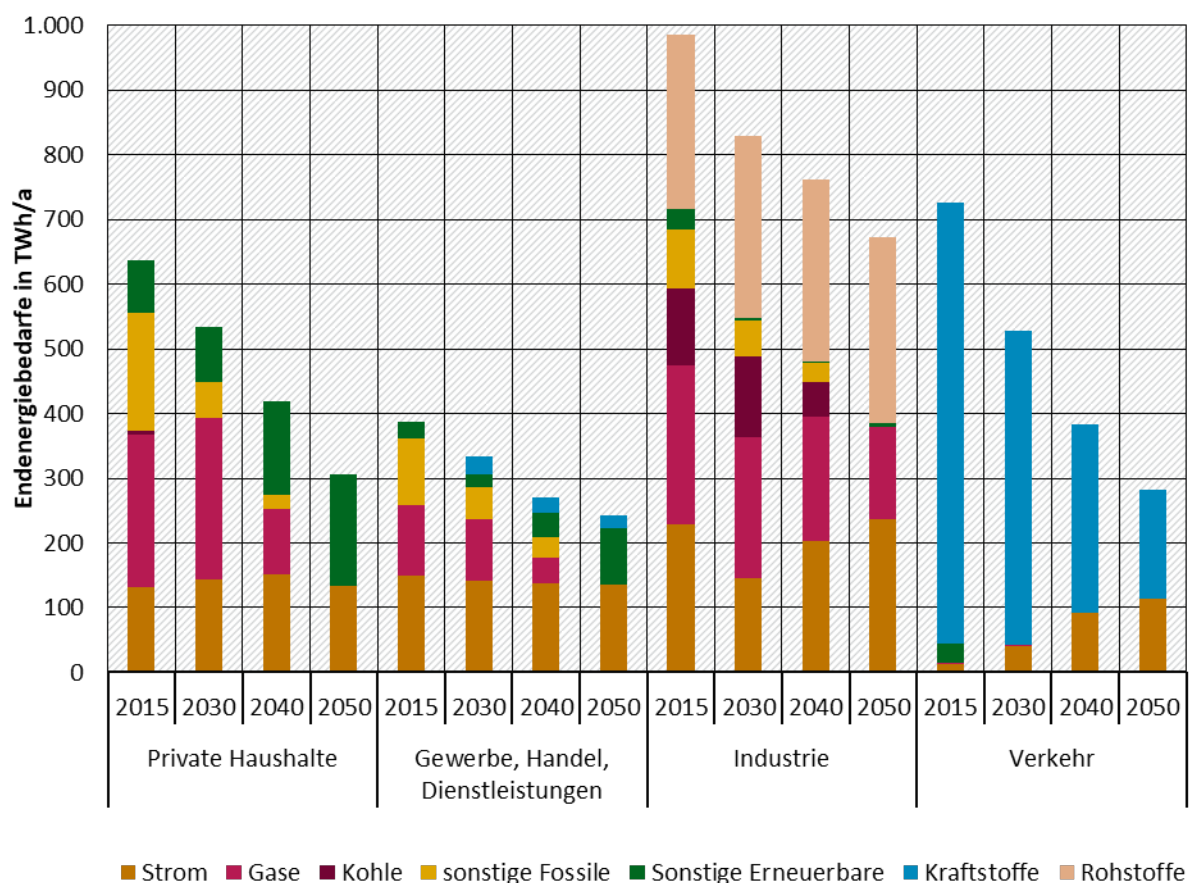
5.1 Energie

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse der Gesamtsystemoptimierung mittels SCOPE und des Verkehrsbereichs mittels TREMOD dargestellt. Dabei wird GreenMe aufgrund der vergleichbaren Annahme zu einer ausgeglichenen Handelsbilanz zusätzlich mit GreenEe2 verglichen

5.1.1 Endenergiebedarfe

Die Entwicklung der Endenergiebedarfe ist differenziert nach Energieträgern und Sektoren in folgender Abbildung 1 dargestellt. Dabei wird in allen Bereichen auch im Bereich der Industrie eine hohe und kontinuierliche Verbrauchsreduktion und Effizienzsteigerung erreicht.

Abbildung 1: Entwicklung der Endenergiebedarfe



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

Der Endenergiebedarf in GreenMe sinkt um 45 % gegenüber 2015 auf 1502 TWh. Im Bereich Verkehr erfolgt die größte sektorale Reduktion des Energiebedarfs, dieser sinkt von 2015 um 61 % bis 2050. Im Bereich Gebäude sind es 46 %. Im Vergleich zum GreenEe2-Szenario wird dabei deutlich, dass die moderate Einsparung von langfristig 3,5 % auf die Effizienzsteigerung zurück zu führen ist. Die ist damit zu begründen, dass in den GreenEe-Szenarien das Energie-Effizienzniveau schon sehr hoch gewählt wurde.

Tabelle 33: Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenMe 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
	SUMME	521	594	126	374	170	683	269	2.737
2030 GreenMe	HH	143	250	0	56	84	0	0	533
	GHD	141	97	0	48	21	27	0	334
	Industrie	145	220	124	55	5	0	282	830
	Verkehr	41	0	0	0	0	486	0	527
	SUMME	470	567	124	159	109	513	282	2.224
GreenEe 2	SUMME	484	560	128	156	111	523	282	2.244
2040 GreenMe	HH	151	101	0	21	145	0	0	418
	GHD	137	41	0	31	38	23	0	270
	Industrie	203	192	54	29	3	0	282	763
	Verkehr	92	0	0	0	0	290	0	383
	SUMME	584	334	54	81	186	313	282	1.834
GreenEe 2	SUMME	581	327	55	79	183	327	282	1.834
2050 GreenMe	HH	134	0	0	0	172	0	0	306
	GHD	135	0	0	0	89	19	0	242
	Industrie	237	143	0	0	6	0	286	672
	Verkehr	115	0	0	0	0	167	0	282
	SUMME	621	143	0	0	267	186	286	1.502
GreenEe 2	SUMME	627	146	0	0	279	200	288	1.540

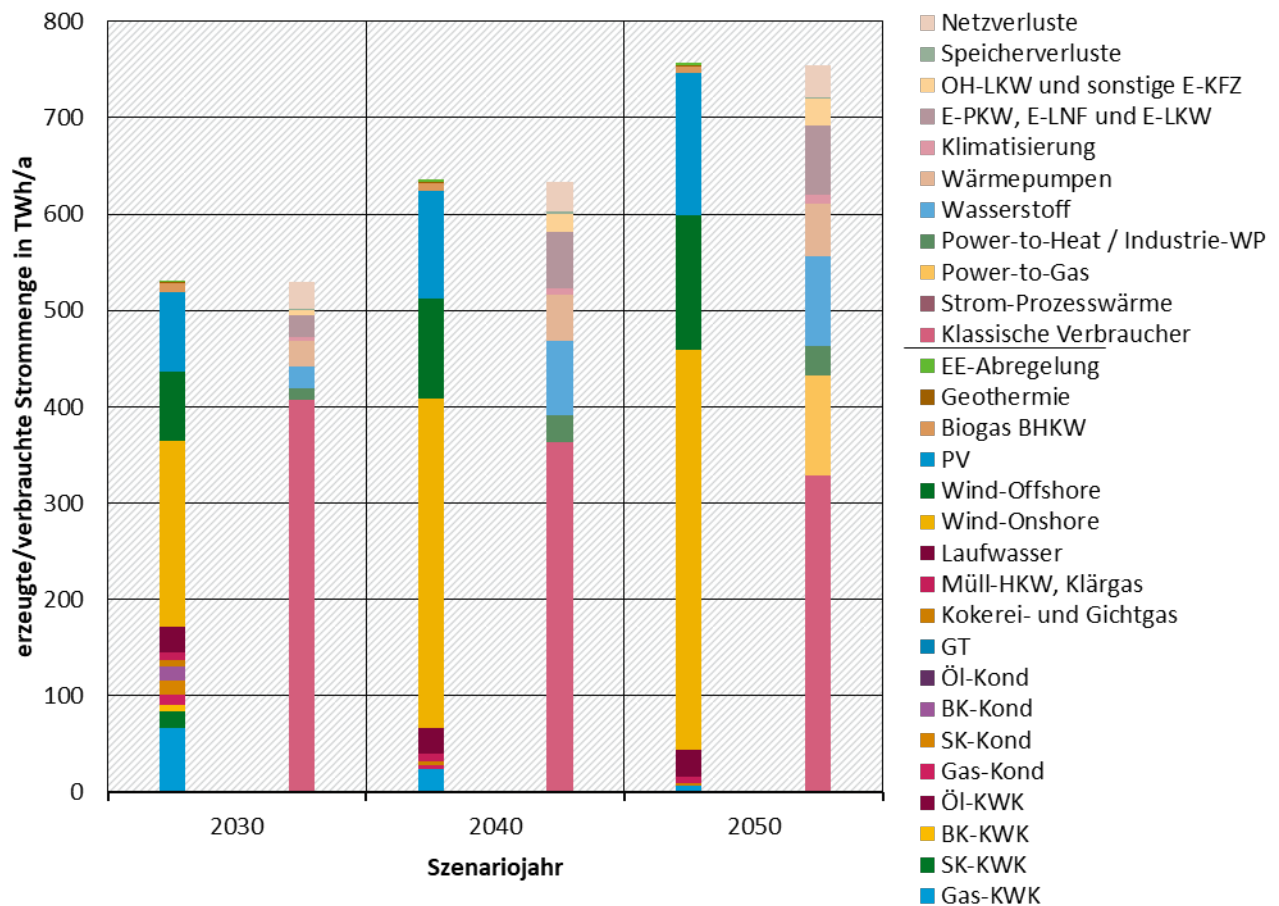
Quellen: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG für 2030, 2040 und 2050

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

Der Nettostromverbrauch (inkl. Stromnetz- und Speicherverluste) steigt bis 2050 vor dem Hintergrund der zunehmenden Sektorkopplung auf 754 TWh an. Einen großen neuen Verbraucher stellen Wasserstoffelektrolyseanlagen für die industrielle Produktion dar. Insgesamt werden hier in 2050 knapp 93 TWh benötigt. Auch besteht in Deutschland das Potential eine geringe Menge von 63 TWh PtG Methan zu erzeugen, wofür 105 TWh Strom benötigt wird. Dies deckt jedoch nur einen kleinen Anteil der PtG/PtL-Nachfrage, welche im Wesentlichen durch Importe gedeckt wird. Im Vergleich zu GreenEe2 ist die nationale PtG-Produktion aufgrund der höheren PV-Kosten (mit dem höheren Dachflächenanteil) geringer, da sich ein kleineres wettbewerbsfähiges Potenzial ergibt. Die Elektromobilität stellt mit 72 TWh den zweit größten neuen Verbraucher in 2050 dar.

Tabelle 34: Nettostromverbrauch zuzüglich Verluste in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

	TWh/a	herk. Verbrauch	PtG	PtH	H2	WP	Klima	E-Mob	OH-Lkw u.a.	Speicherlust	Netzverlust
2030	GreenMe	407,1	0,0	12,7	22,6	25,5	4,9	22,5	4,9	0,9	28,0
	Green-Ee2	412,6	0,0	11,4	22,6	26,0	4,9	21,7	5,1	0,2	28,0
2040	GreenMe	363,4	0,0	28,0	77,6	46,8	7,3	57,9	19,5	2,0	30,7
	Green-Ee2	361,5	0,0	18,5	78,6	44,4	7,3	56,8	20,3	2,0	30,7
2050	GreenMe	328,1	104,8	30,1	93,2	54,3	9,6	71,9	27,7	1,5	33,0
	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

Charakteristisch leisten Photovoltaik und Windenergie onshore mit 416 TWh etwa 55 % den größten Beitrag zur Nettostromversorgung in 2050. Im Vergleich zu dem GreenEe2-Szenario wird eine geringere nationale Stromerzeugung notwendig (langfristig - 33 TWh). Gas nimmt aufgrund des Fuel-Switchs bereits 2030 eine stärkere Rolle als Brückentechnologie in der Stromerzeugung ein als in den GreenEe-Szenarien, während der Anteil von Kohlestrom geringer ist.

Tabelle 35: Nettostromerzeugung in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

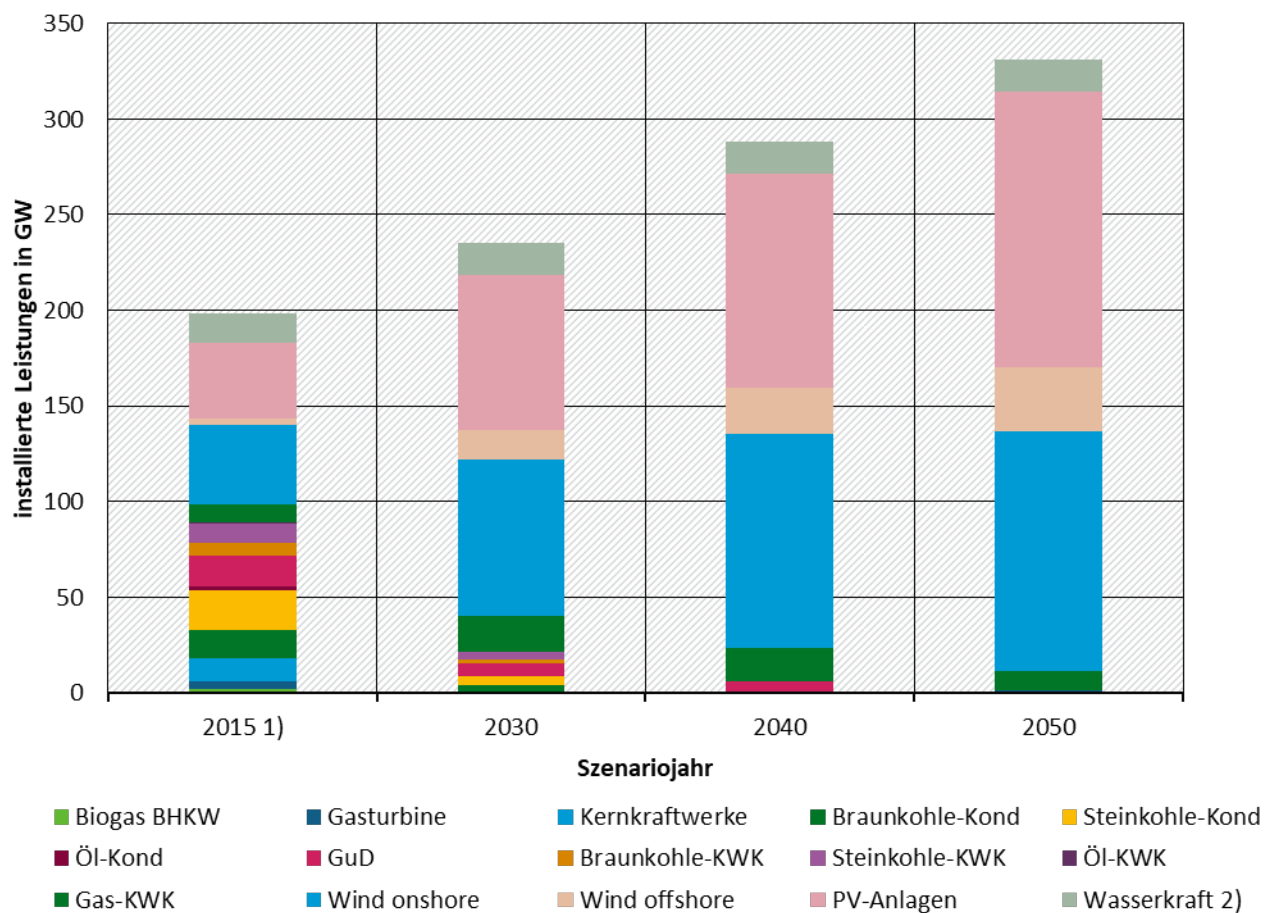
	TWh/a	Wasser	Bio	Geothermie	Müll, Klärg.	Gas	Braunkohle	Steinkohle	Onshore	Offshore	PV	SUMME	EE-Abregel
2030	Green Me	26,0	10,0	0,6	8,2	83,0	22,1	32,1	193,7	71,3	81,9	529,0	0,6
	Green Ee2	25,9	10,0	0,6	8,3	59,9	30,0	43,9	192,8	71,3	89,7	532,4	0,2
2040	Green Me	26,6	8,0	0,9	7,4	32,4	0,0	0,0	342,5	103,8	111,5	633,1	2,8
	Green Ee2	26,5	8,0	0,9	7,5	53,3	0,0	0,0	300,3	103,8	119,8	620,1	0,0
2050	Green Me	26,9	6,5	1,3	6,8	9,8	0,0	0,0	415,8	139,7	147,3	754,2	2,4
	Green Ee2	26,9	6,5	1,4	6,9	10,8	0,0	0,0	418,9	139,7	176,3	787,5	4,2

Quelle: eigene Analysen

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.

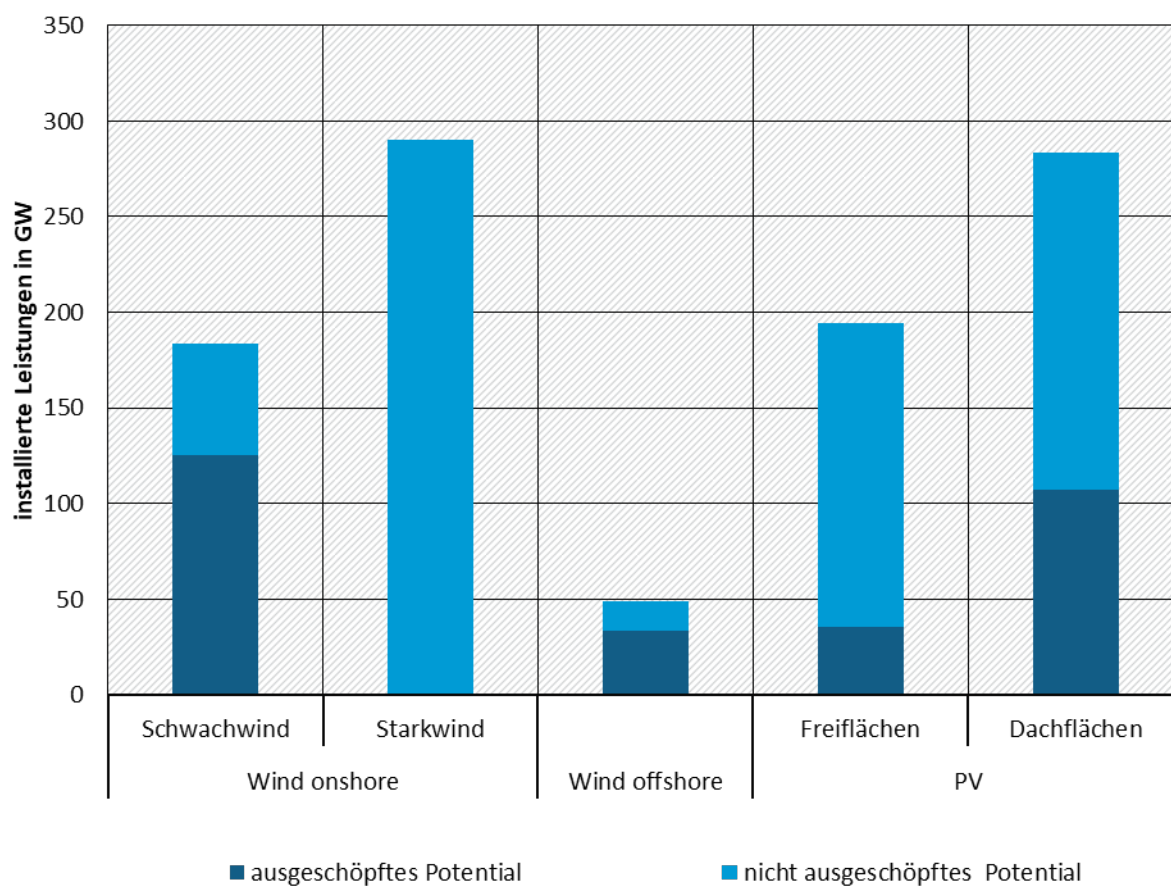
Abbildung 3: Installierte Leistungen in Deutschland



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. Wie auch in den anderen Green-Szenarien werden 2050 ausschließlich Schwachwind Anlagen installiert und dabei etwa 68 % des vorab festgelegten Potentials ausgenutzt. Das Verhältnis der Dach- zu Freiflächen-PV-Anlagen ist dabei exogen vorgeben und stellt kein Ergebnis der Modellierung dar. Für Wind-Offshore wird die vorgegebene Mindestleistung von rund 32 GW ausgebaut.

Abbildung 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 befindet sich zwischen den Bandbreiten von Ober- und Untergrenze. PV befindet sich in 2030 aufgrund höherer Kosten an der Untergrenze des für 2050 notwendigen Wertes. In 2040 ist der ökonomische Anreiz vergleichbar zu Wind-Onshore, so dass auch eine mittlere Leistung ausgebaut wird.

Tabelle 36: Markthochlauf Wind-Onshore und PV

	Wind Onshore			PV		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Korridor-Obergrenze	103,2	127,5		110,2	129,9	
Korridor-Untergrenze	60,1	91,9		80,7	100,3	
Ergebnis	82,0	111,7	125,1	80,7	111,9	143,5

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Aus dem Vergleich mit den GreenEe2-Szenarien wird deutlich, dass es langfristig insbesondere weniger PV (-25 GW) braucht, um die geringere nationale direkte Stromnachfrage decken zu können. Auch wird PV wegen der schlechteren Materialeffizienz aufgrund der gestiegenen Kosten bei höherem Anteil von Dachflächenanlagen im Verhältnis zu Wind geringer ausgebaut.

Tabelle 37: Installierte Leistungen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

G W		Bio	Gas	Kern- kraft	Brau- n- kohl- e	Stein- kohl- e	Öl	On- shor- e	Off- shor- e	PV	PtG	Batt Spei- cher	Was- ser
2015		2,4	29,9	12,1	21,1	30,9	2,6	41,2	3,3	39,8	0,0	0,0	14,9
	Green-Me	0,1	25,9	0,0	5,2	8,7	0,2	82,0	15,6	80,6	0,0	0,0	16,7
2030	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
	Green-Me	0,1	23,7	0,0	0,0	0,0	0,1	111,7	23,8	111,9	0,0	0,0	16,7
2040	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
	Green-Me	0,1	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0	125,1	33,7	143,5	26,6	0,0	16,8
2050	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

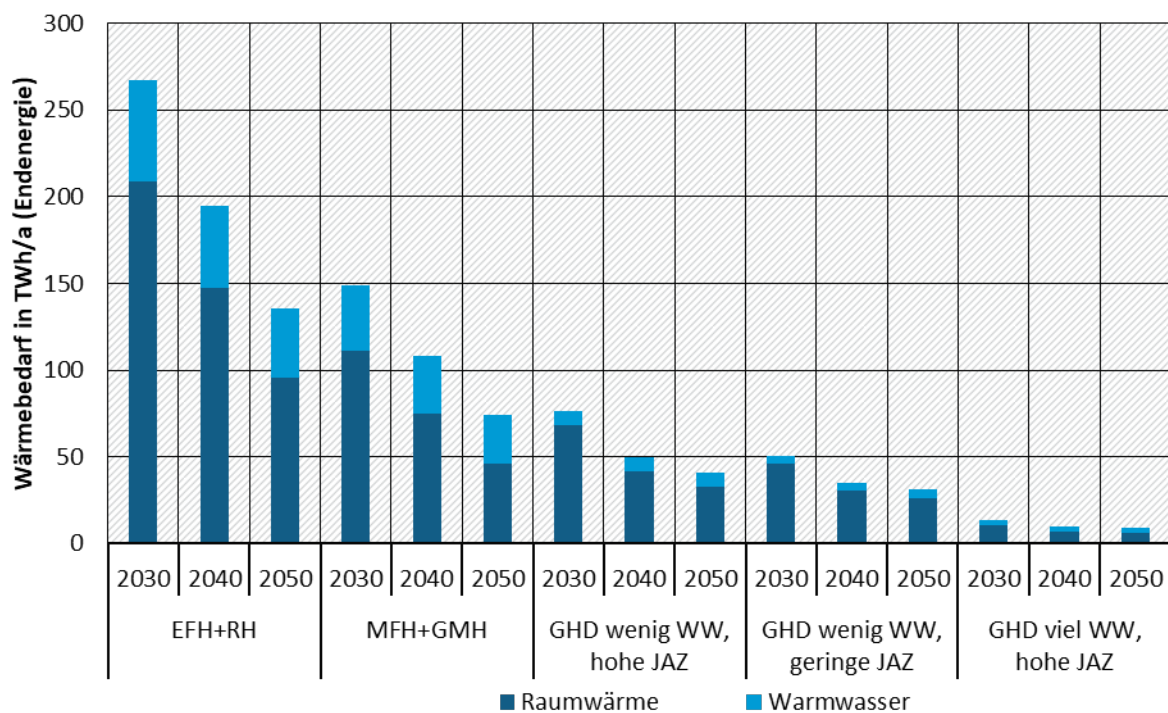
Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG für 2030, 2040 und 2050

5.1.3 Wärmesektor

5.1.3.1 Gebäudewärmeversorgung im Bereich Haushalte und GHD

Auf Basis der Zwischenergebnisse zu der Gebäudewärmebedarfsentwicklung und den EE-Wärmepotenzialen im Szenario GreenEe (Kapitel zur Annahmen und Inputdaten für SCOPE) werden im Folgenden die Ergebnisse der Gesamtsystem-Optimierungsrechnung und damit die Rückkopplung der THG-Emissions-Ziele auf die Investitionsentscheidungen in der Wärmeversorgung dargestellt. Die Entwicklung der Gebäudewärmebedarfe für Haushalte und GHD ist noch einmal in Abbildung 5 zusammengefasst.

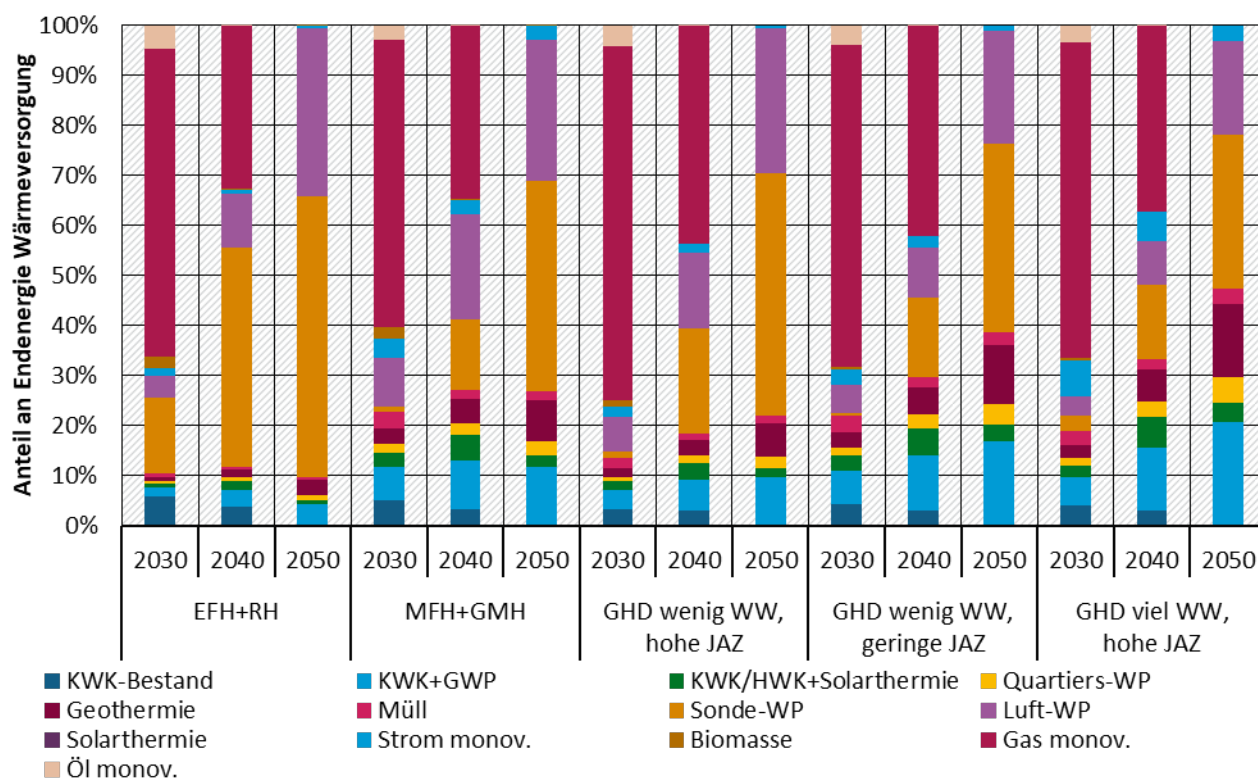
Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Raum- und Trinkwarmwasserwärme in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden (GHD) – GreenMe = GreenEe1/Ee2



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

Die relative Deckung dieser Wärmenachfrage ist in Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Deckung der Wärmenachfrage (Raumwärme und Trinkwarmwasser) im Bereich Wohngebäude und GHD-Nichtwohngebäude in GreenMe



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

In allen Green-Szenarien außer GreenLate kommt die Technikkombination modernen KWK-Solarthermienetze im Rahmen der kostenoptimierten Wärmeversorgung nur durch das Wechselspiel mit dem Stromsystem mit langfristig hohen Deckungsanteilen von PtH (Elektrodenkesseln) überhaupt zum Einsatz (1,6 %). 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 (8,4 %) bereitgestellt.

Tabelle 38: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

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

	Festlegungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenMe		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Geothermie + Solarthermie-ganzjährig	Obergrenze (Potenzial)	1,3 %	3,0 %	5,8 %	1,8 %	3,1 %	5,9 %
Müll + Biomasse	Festsetzung (ohne Kostenannahmen)	2,0 %	1,1 %	1,2 %	1,9 %	1,1 %	1,2 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Bei der dezentralen Wärmeversorgung wird das langfristige Potenzial für Erdsonden in 2050 weitestgehend ausgeschöpft. Sie leisten bis 2050 den größten Anteil (48,7 %) zur dezentralen Wärmeversorgung. Konventionelle Heiztechniken werden entsprechend der Annahmen im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. 2020a) bis 2050 vollständig verdrängt. Das Ergebnis ist mit den anderen Green-Szenarien außer GreenLate vergleichbar.

Tabelle 39: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

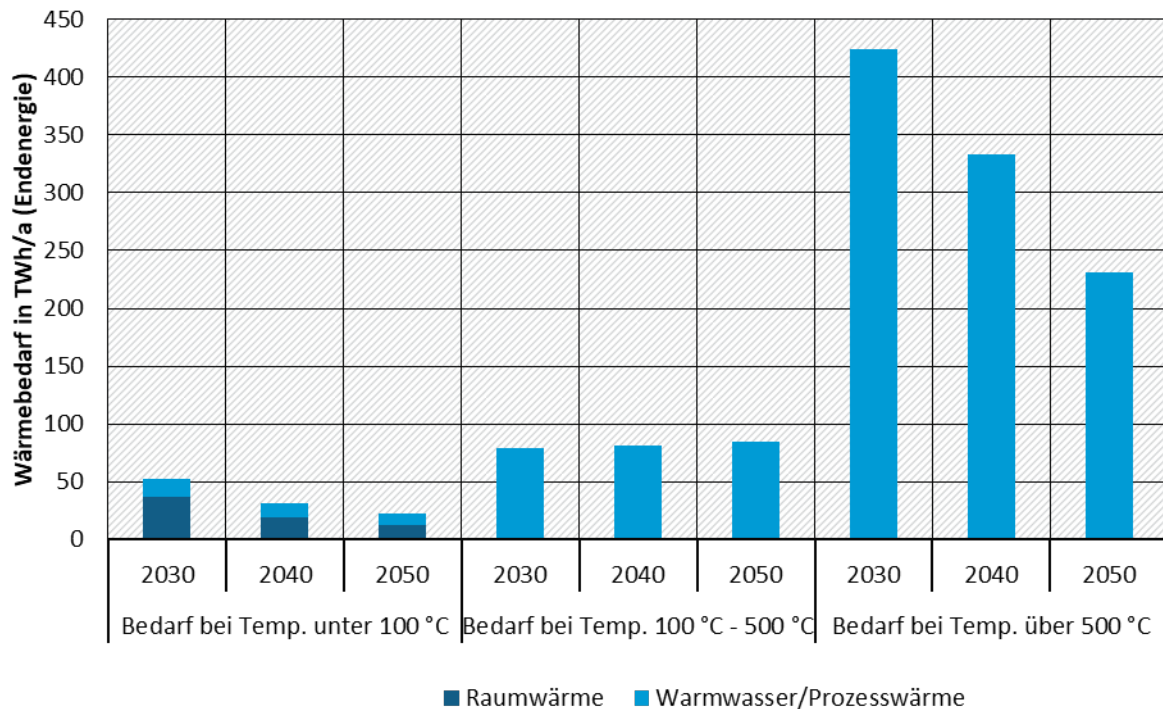
	Festlegungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenMe		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Sonde-WP	Obergrenze aus GEMOD	7,3 %	28,6 %	46,3 %	7,7 %	29,7 %	48,7 %
Luft-WP	Frei	6,2 %	12,8 %	28,3 %	6,3 %	14,0 %	30,0 %
Solarthermie	Aus GEMOD	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Strom monov.	Aus GEMOD	2,6 %	1,9 %	1,4 %	2,5 %	1,7 %	1,2 %
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 %	62,0 %	35,6 %	0,0 %
Öl monov.	Aus GEMOD	4,0 %	0,0 %	0,0 %	4,0 %	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).

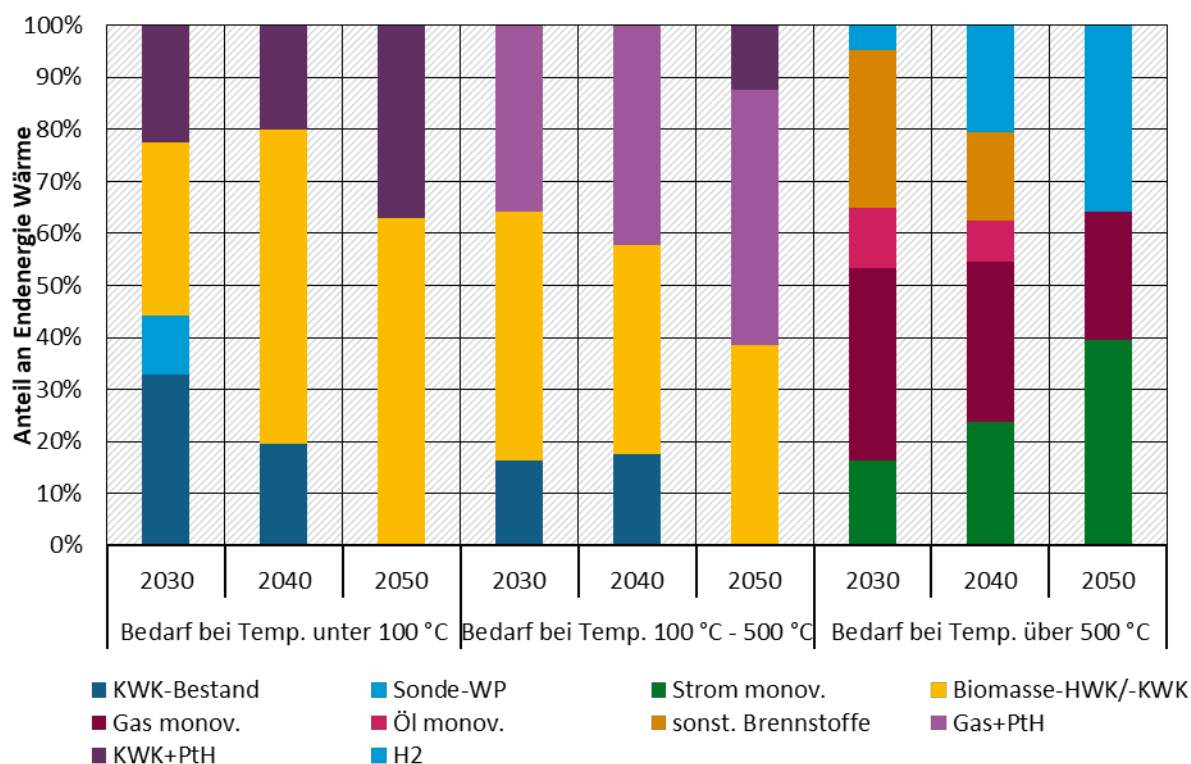
Abbildung 7: Zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD-Prozesswärme



Quelle: eigene Berechnungen 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 GreenMe dargestellt. Im Vergleich zu GreenEe2 benötigt der nationale Verkehr im Jahr 2030 2-3 % weniger Endenergie, bis 2050 steigt diese zusätzliche Endenergieeinsparung auf 6-8 %. Dabei sind die zusätzlichen Einsparungen im Jahr 2050 im Güterverkehr mit 9 %-13 % höher als im Personenverkehr mit 4 %. Grund dafür sind die angenommenen zusätzlichen Effizienzverbesserungen durch Leichtbau sowie im Straßengüterverkehr die langfristige Verschiebung auf vollelektrische Oberleitungs-Lkw anstelle von Dieselhybridfahrzeugen. Auch im internationalen Verkehr führen die zusätzlich angenommenen technischen Verbesserungen, speziell in der Seeschifffahrt zu zusätzlichen Endenergieeinsparungen um 1 % (2030) bis 3 % (2050).

Tabelle 40: EEV nach Verkehrsmitteln GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe
MIV	384	255	247	164	156	99	94
ÖSPV	16	15	15	13	13	11	11
ÖV Schiene	10	10	10	10	10	10	10
Güter Straße	193	134	133	96	92	74	67
Güter Schiene	5	5	5	6	5	6	6

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe
Güter Binnenschiff	4	3	3	3	3	3	3
Flug national	10	4	7	6	6	4	4
Flug internat.	87	105	105	91	91	77	77
Seeverkehr intern.	27	20	18	17	15	15	12
Gesamt national	621	430	420	297	285	207	195
International	114	125	123	108	105	92	89
Gesamt	735	554	543	405	390	299	284

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - TREMOD

Alternativ ist in Tabelle 41 der Endenergiebedarf nach Energieträger aufgeschlüsselt dargestellt. Unterschiede zwischen den Szenarien resultieren im Personenverkehr aus den zusätzlichen Effizienzverbesserungen innerhalb der einzelnen Antriebskonzepte, aber nicht aus abweichenden Anteilen von elektro- und verbrennungsmotorischen Fahrzeugen in den Fahrzeugflotten. Im Güterverkehr ist zusätzlich die in GreenMe angenommene langfristige Vollelektrifizierung von Oberleitungs-Lkw von Bedeutung, wodurch der Kraftstoffverbrauch stärker sinkt. Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenMe etwa 2 % weniger Kraftstoff und ebenso 2 % weniger Strom benötigt als in GreenEe. Im Jahr 2050 werden in GreenMe 1-3 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 12-14 % (national) bzw. 8-9 % (Summe national + international) niedriger als in den GreenEe-Szenarien.

Tabelle 41: EEV nach Energieträgern GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe
Kraftst. Straße PV	398	250	242	126	120	45	43
Kraftst. Straße GV	193	125	124	66	61	37	27
Kraftst. Schiene + Binnschiff	8	6	6	6	6	5	5
Kraftst. Flug nat.	10	7	7	6	6	4	4
Strom Straße PV	0	18	17	49	46	63	60
Strom Straße GV	0	9	9	31	31	38	40

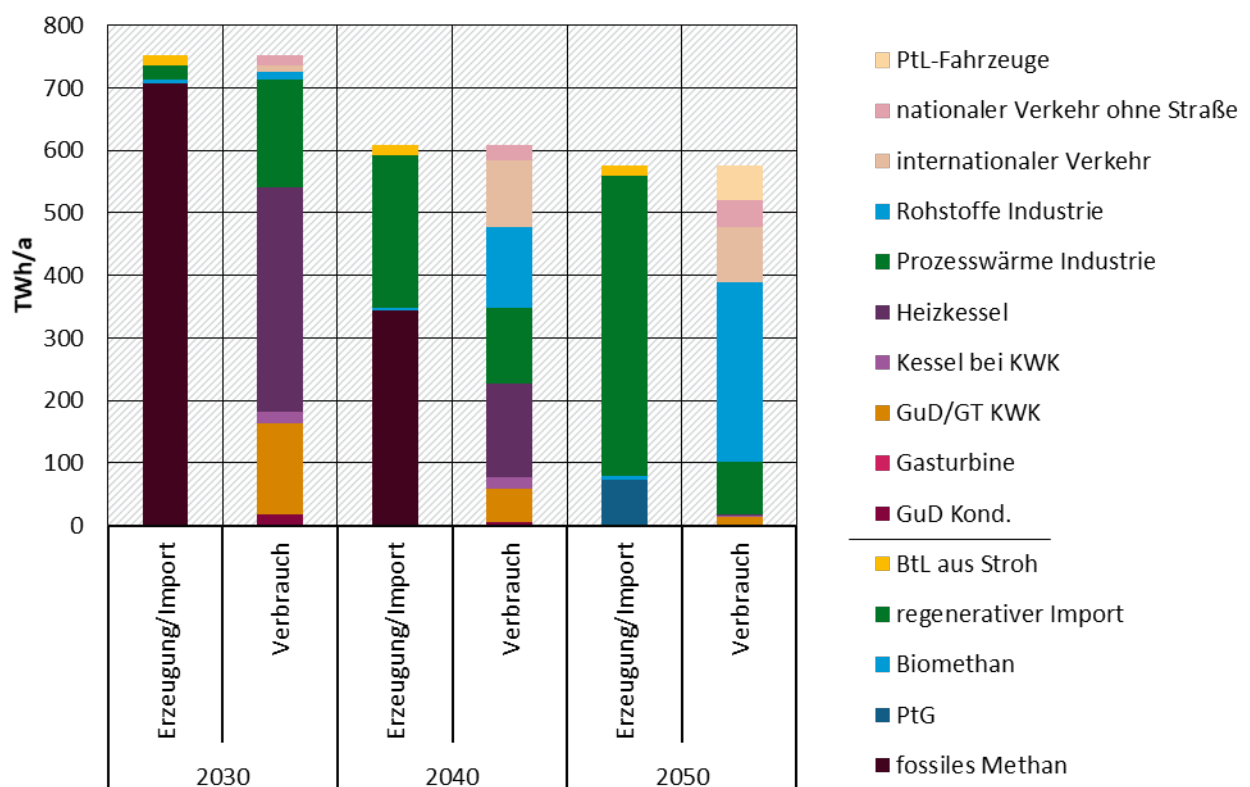
TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe	GreenEe2	GreenMe
Strom Straße Schiene	12	14	14	15	15	15	15
Kraftst. Internat.	114	125	123	108	105	92	89
Kraftstoff nat.	609	388	379	203	193	91	80
Strom	12	41	40	94	92	116	115
Kraftstoff Summe	723	513	502	311	298	183	169

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

5.1.5 Gas- und PtL-Versorgung

Durch den Ausstieg aus der Kohlenutzung, verbleiben neben Strom und Holz und anderen Reststoffe insbesondere Gase und Kraftstoffe als Energieträger. Die Auswertung der Gas- und Kraftstoffbilanz inkl. der nichtenergetischen Verbrauchs (Rohstoffe Industrie) ist im Folgenden dargestellt.

Abbildung 9: Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und -versorgung



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

Der langfristige Brennstoffbedarf sinkt durch die zunehmende Nutzung von Strom als Endenergie in den Anwendungen auf ein ähnliches Niveau wie GreenEe2. Bei GreenMe ist der

Anteil der Importe mit 83,3 % etwas höher als in GreenEe2 mit 81 %. In 2030 ist dagegen der Brennstoffverbrauch größer, dass mehr fossiles Erdgas zur Stromerzeugung verbraucht wird, aber die Einsparungen bei Kohleverbrauch in dieser Bilanz nicht auftauchen.

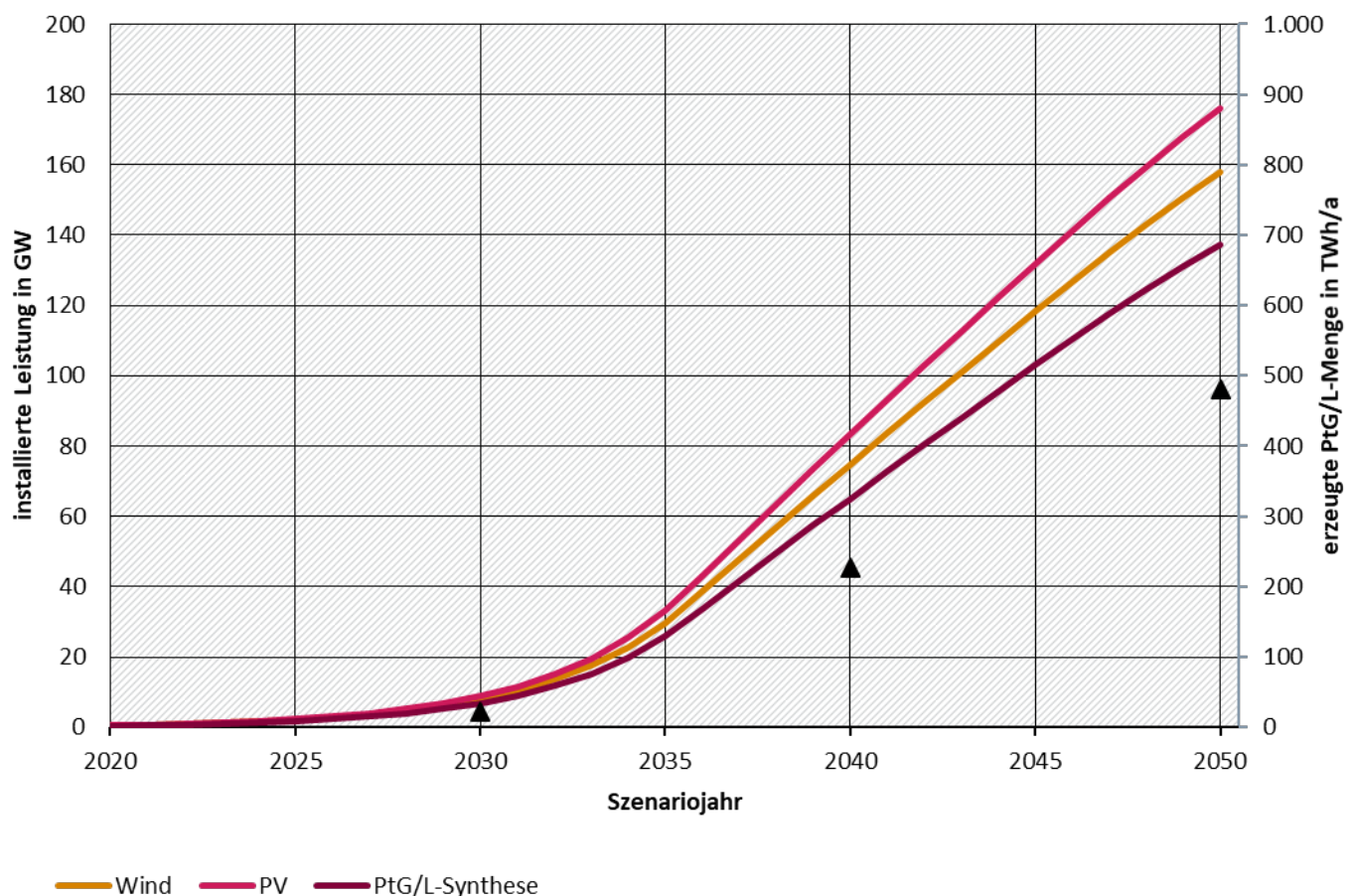
Tabelle 42: Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

TWh/a		Erdgas	PtX-national	PtX-Import	Biomethan	PtL aus Stroh	SUMME
2030	GreenMe	706,5	0,0	22,9	7,0	15,9	752,3
	Green-Ee2	647,9	0,0	22,4	7,0	15,9	693,1
2040	GreenMe	343,2	0,0	243,1	5,2	16,8	608,3
	Green-Ee2	365,9	0,0	221,5	7,0	16,8	611,1
2050	GreenMe	0,0	73,3	480,4	5,2	17,7	576,6
	Green-Ee2	0,0	86,6	466,6	5,2	17,7	576,1

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

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

Abbildung 10: Notwendiger Markthochlauf für eine PtG/L-Import-Infrastruktur

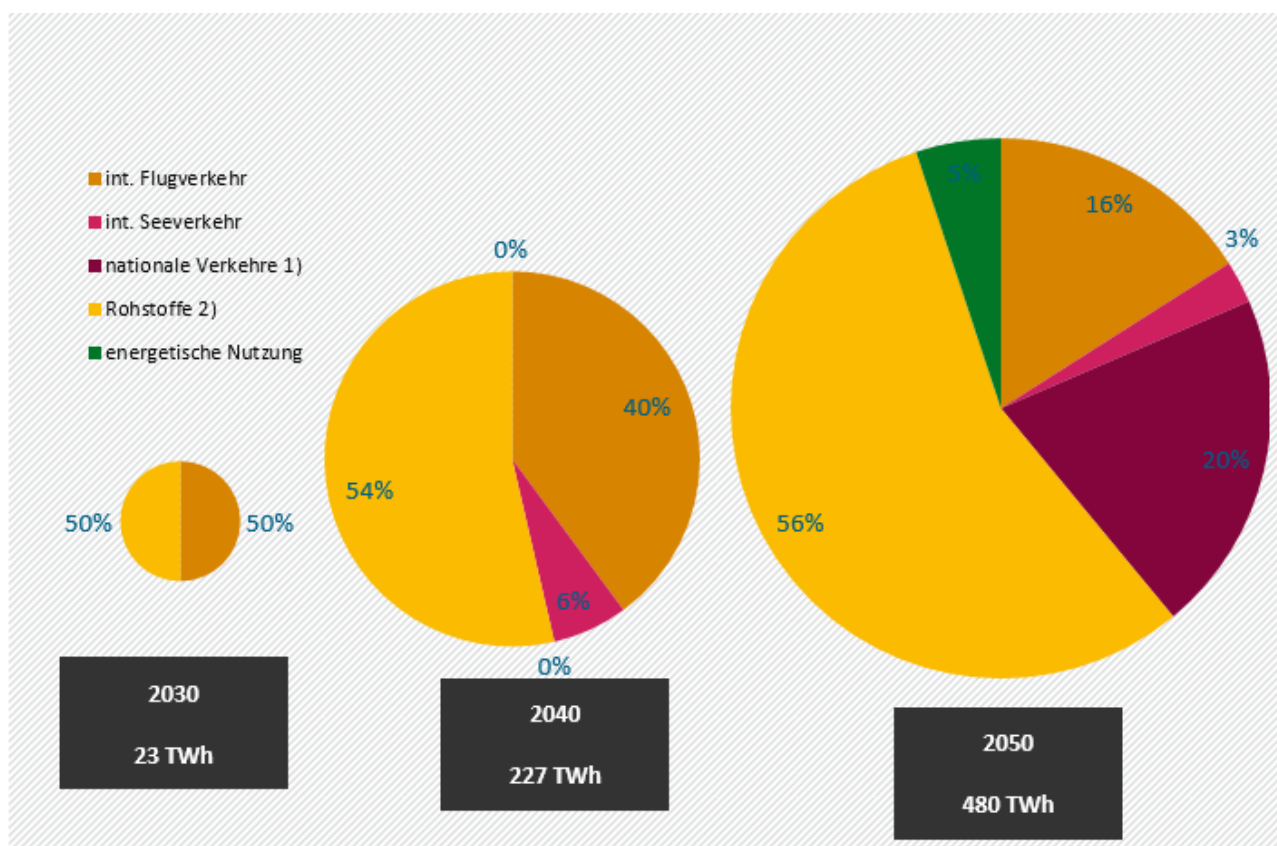


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Wie in den anderen Green-Szenarien werden vornehmlich die Bedarfe des internationalen Verkehrs und der stofflichen Nutzung gedeckt. Wie in den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme GreenSupreme gelangen erst nach 2040 PtG/L-Importe in die nationalen

Anwendungsbereiche, wie Verkehr, Gebäude und Industrie zur Prozesswärmeversorgung und wirken erst dann auf das nationale THG-Emissionsziel wie in Abbildung 11 dargestellt ist.

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



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen 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

Der Vergleich der PtG/L-Importe zwischen GreenMe und GreenEe2 im Pfad ist in Tabelle 43 noch einmal dargestellt. Wie in den GreenEe-Szenarien und GreenMe wurde eine 15 %ige Überbauung unterstellt. Entsprechend ergibt sich eine gleiche relative Entwicklung des Markthochlaufs. Dennoch sind aufgrund der höheren PV-Stromgestehungskosten und das damit verbundene geringeren nationalen wettbewerbsfähigen PtG-Potenzial langfristig höhere absolute PtG/L-Importmengen notwendig als in GreenEe.

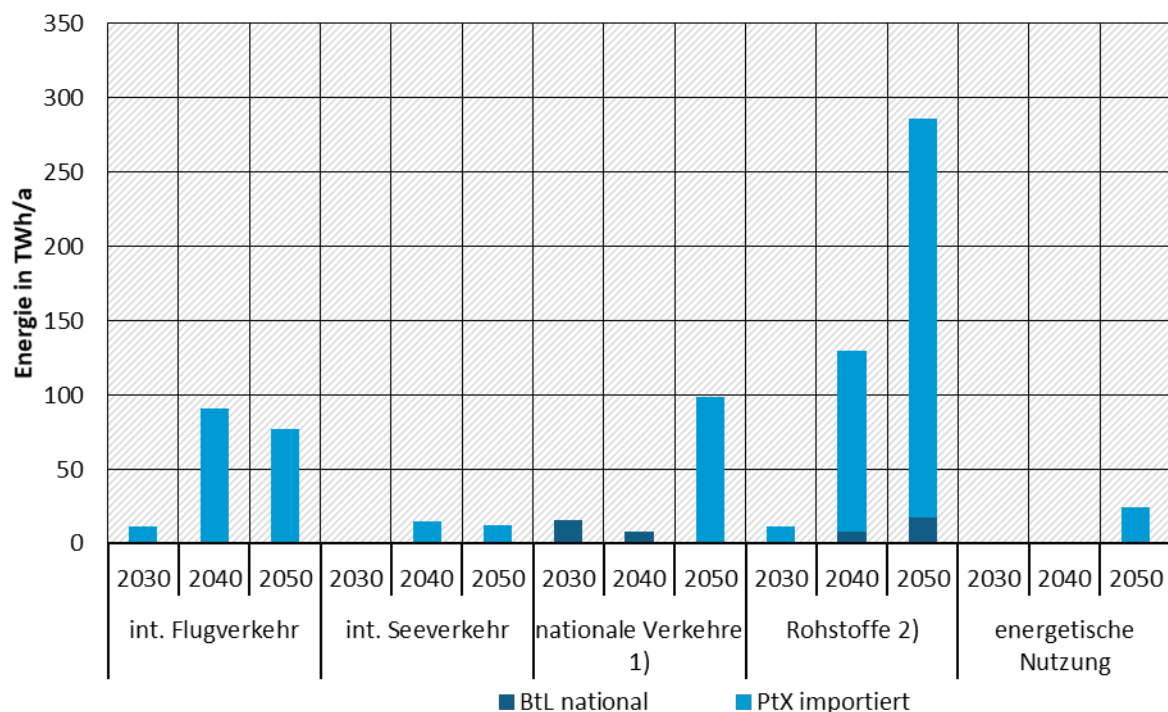
Tabelle 43: Entwicklung der PtG/L-Importmengen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2

	GreenEe2		GreenMe	
	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050
2030	22,3	5 %	22,9	5 %
2040	220,3	47 %	226,9	47 %
2050	466,6	100 %	480,4	100 %

Quelle: ifeu/IEE/SSG - SCOPE

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

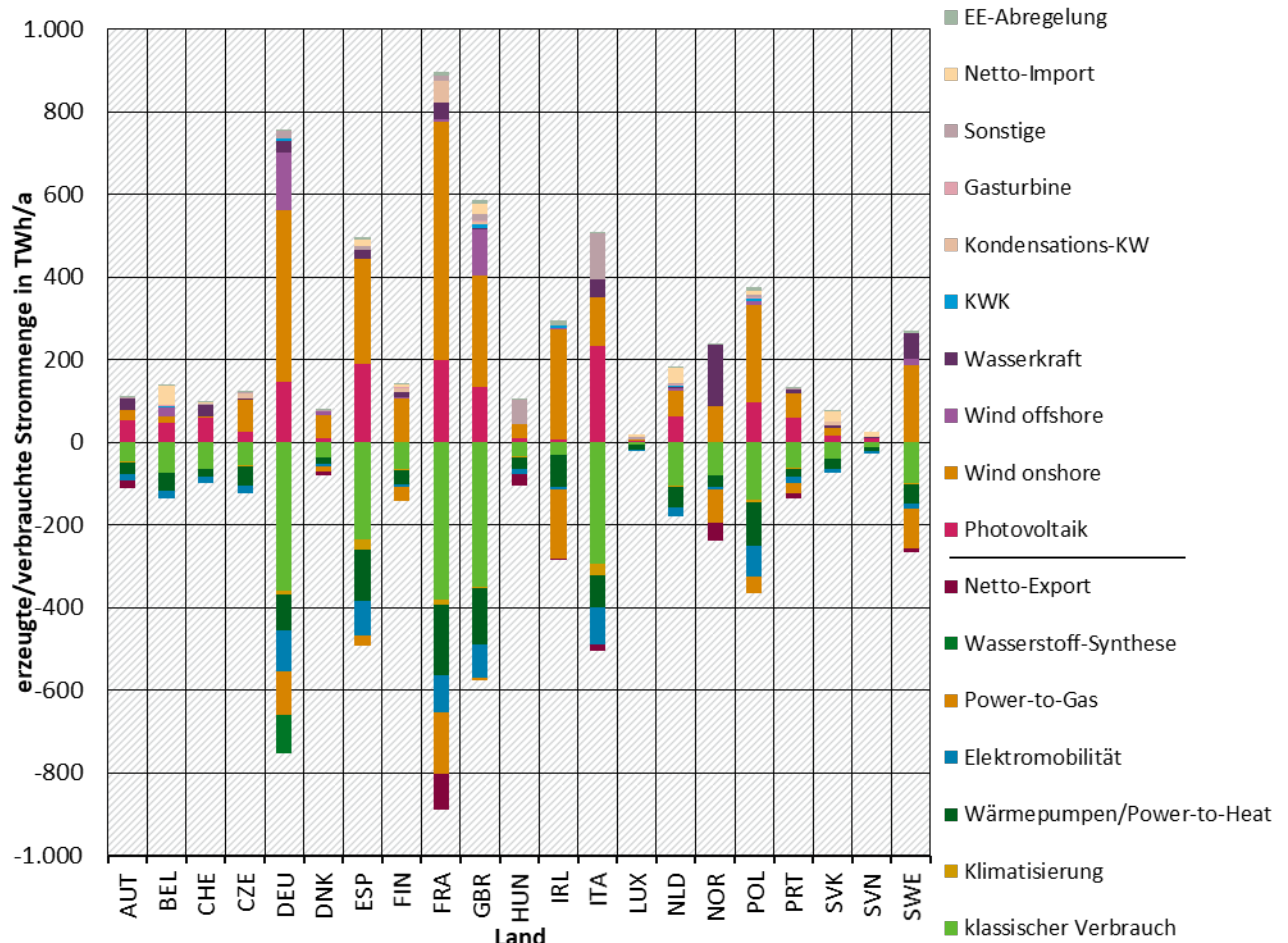
Unter diesen Rahmenbedingungen werden auch die Entwicklungen des europäischen Kraftwerksparkes mit abgebildet und sind nachfolgend dargestellt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Fokus der RESCUE-Studie auf der nationalen Entwicklung in Deutschland lag.

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

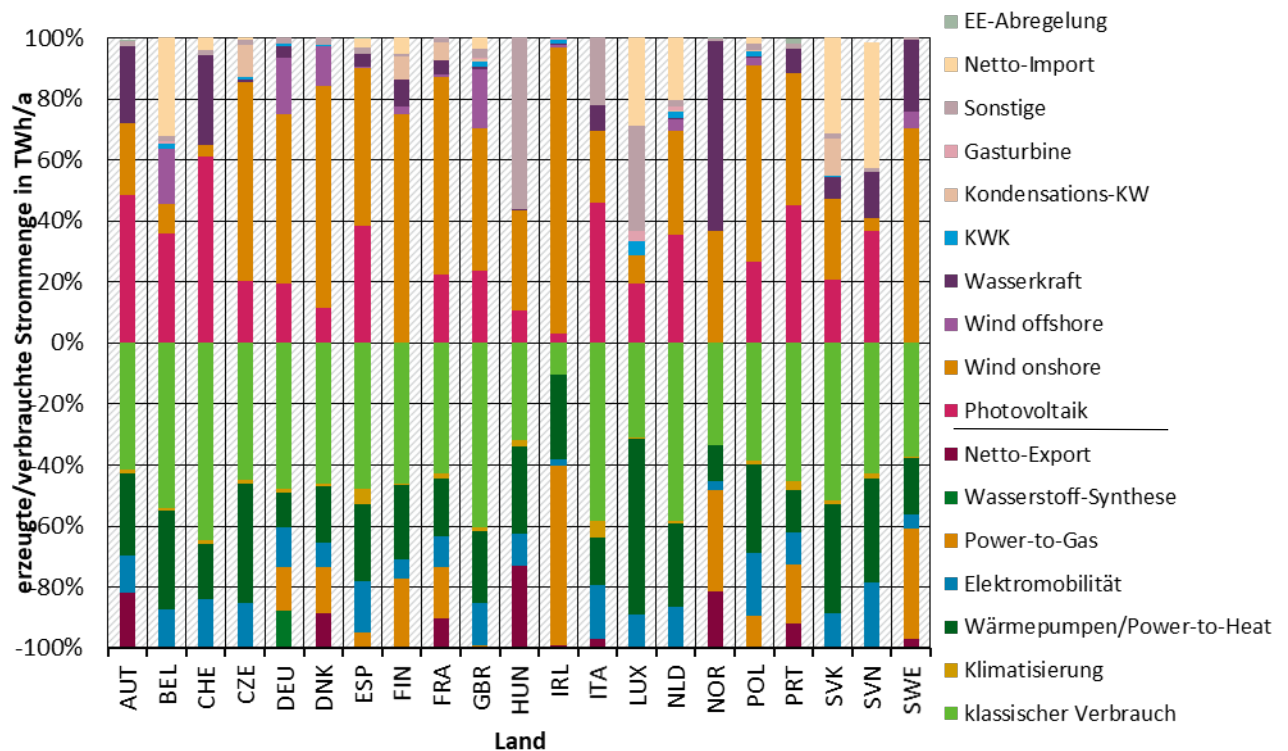
oder Norwegen, während andere Länder, wie Belgien oder Niederlande, auf Stromimporte angewiesen sind. Als ein großes Land weist Großbritannien aufgrund begrenzter Onshore-Potenziale auch einen gewissen Stromimport mit deutlich geringeren Anteil am Gesamtverbrauch auf wie Abbildung 14 zeigt.

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 in GreenMe

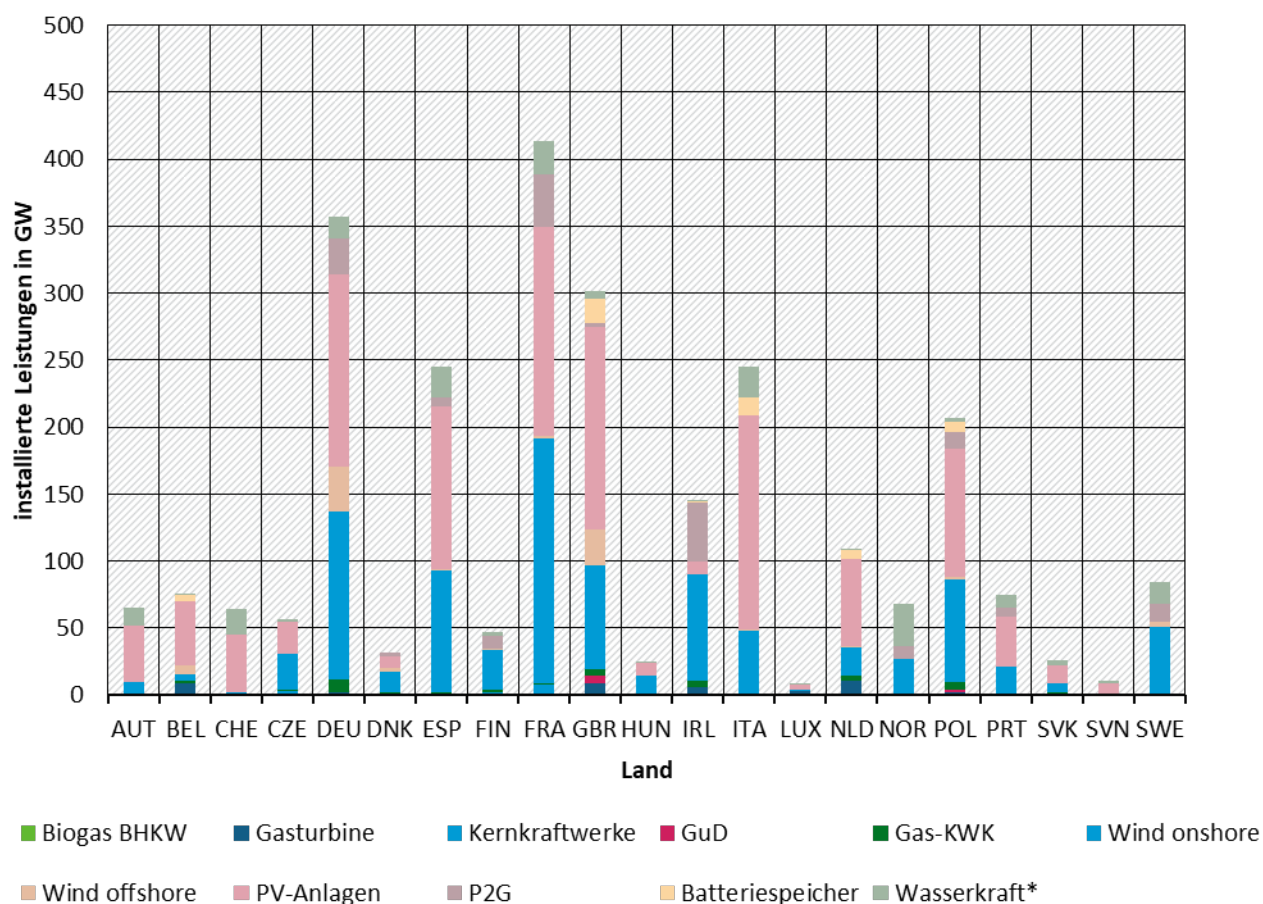


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

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 in 2050



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

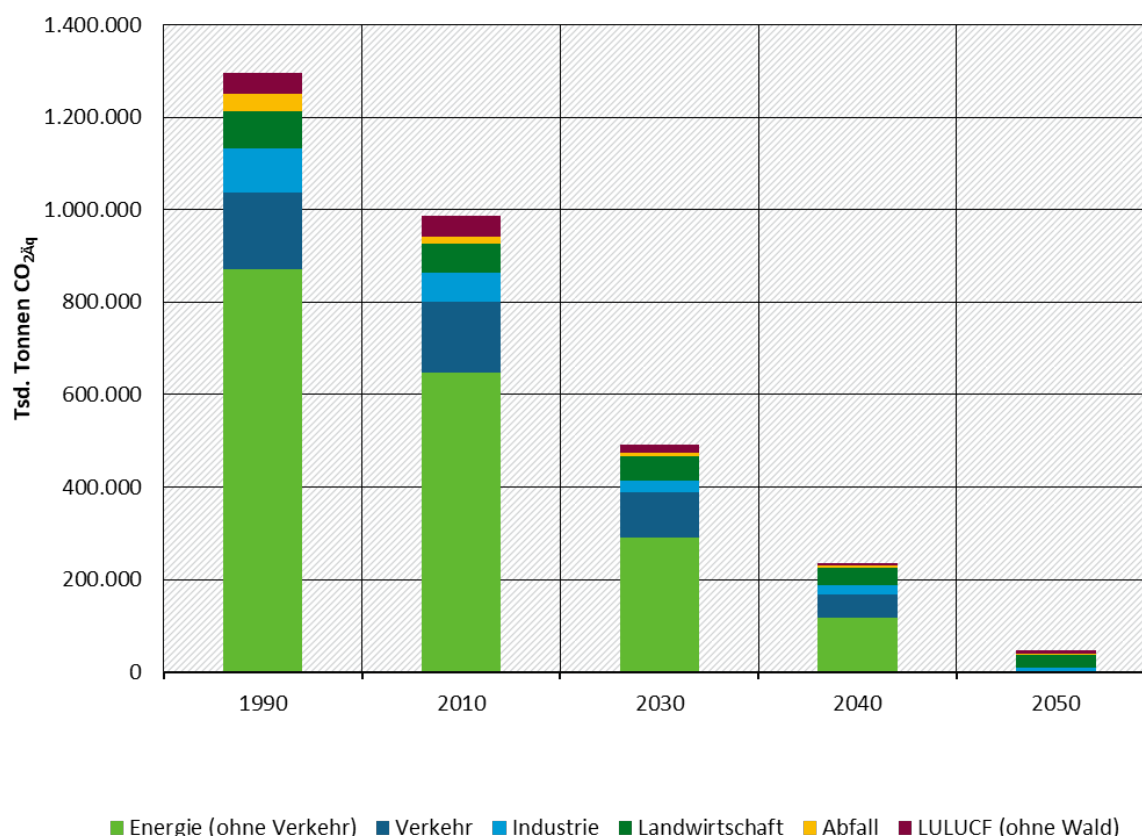
5.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

5.2.1 Übersicht über die Entwicklung aller Treibhausgas-Emissionen

Die Treibhausgasemissionen in GreenMe betragen 46,293 Mio. t CO₂A_q in 2050 und gehen damit um 96,4 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück (Abbildung 16). Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 62 % [81,8 %].

Die Berechnungen der THG-Emissionen erfolgen in diesem Bericht entlang der NIR-Vorgaben, in der Quellgruppe LULUCF ohne Wald und Waldprodukte. Die THG-Emissionen wurden durch UBA auch nach dem Vorgehen im Klimaschutzplan berechnet (BMUB 2016a; UBA 2019c). Demnach sinken die THG-Emissionen in GreenMe bis 2030 in allen Sektoren stärker als es die Ziele des Klimaschutzplanes vorsieht und sogar im Verkehr werden die Sektorziele erreicht (-55 %) (UBA 2019a).

Abbildung 16: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050



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

Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (84,1 %) (Tabelle 44). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 34,3 % gegenüber 1990 zurückgehen. In GreenMe sind die THG-Emissionen in allen Sektoren geringer als die sektoralen Ziele des Klimaschutzplans.

In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, emissionsneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 92,4 %, 85,6 % und 89,2 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 66,8 %.

Tabelle 44: Emissionsminderungen GreenMe in 2030 und 2050 gegenüber 1990

	Emissionen historisch bzw. GreenLate in Mio. t CO ₂ Äq			Rückgang gegenüber 1990 in %	
	1990 ¹	2030 ³	2050 ³	Bis 2030 ³	Bis 2050 ³
Energie, ohne Verkehr	871,3	291,4	0	-66,6 %	-100
Verkehr	164,4	97,3	0	-40,8 %	-100
Industrie	96,4	25,8	10,4	-73,2	-89,2
Landwirtschaft	79,8	52,4	26,5	-34,3	-66,8

	Emissionen historisch bzw. GreenLate in Mio. t CO ₂ Äq			Rückgang gegenüber 1990 in %	
	1990 ¹	2030 ³	2050 ³	Bis 2030 ³	Bis 2050 ³
Abfall	38,0	6,0	2,9	-84,1	-92,4
LULUCF, ohne Wald	45,2	19,3	6,5	-57,4	-85,6
Summe	1.295,0	492,2	46,3	-62,0	-96,4

Quellen: ¹(Dittrich et al. 2020b; UBA 2019c), ²(BMUB 2016a), ³ ifeu; Unstimmigkeiten gehen auf Rundungen zurück; ⁴ UBA (2019a) E = Energie, G = Gebäude

Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs zu nennen. Im Verkehr setzen sich die THG-Emissionen aus den THG-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt und des Flugverkehrs zusammen. Bis 2030 steigen diese im Flugverkehr und sinken im internationalen Schiffsverkehr auf insgesamt 30,2 Mio. t CO₂Äq. 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 CO₂ aufnehmen wird (Rüter et al. 2017). Da jedoch die Nachfrage nach Holz und Holzprodukten in GreenMe rückläufig ist (siehe Kap. 3.1.5), verbleibt mehr Holz im Wald als im WEHAM-Szenario angenommen. Die Senkenwirkung ist damit höher.

5.2.2 Treibhausgas-Emissionen nach Quellgruppen

5.2.2.1 Treibhausgas-Emissionen im Energiesektor, einschließlich Verkehr

Die THG-Emissionen des Energiesektors sind im Folgenden entsprechend der Emittenten differenziert dargestellt.

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

		2030	2040	2050
Stromerzeugung + KWK (SCOPE - endogen)	Öl-KWK-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Öl-Kondensations-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Steinkohle-KWK-Kraftwerke	13,7	0,0	0,0
	Steinkohle-Kondensationskraftw.	10,9	0,0	0,0
	Braunkohle-KWK-Kraftwerke	7,1	0,0	0,0
	Braunkohle-Kondensationskraftw.	14,0	0,0	0,0
	Gas-KWK-Kraftwerke	32,8	13,8	0,0
	GuD-Kondensationskraftwerke	3,4	1,1	0,0

		2030	2040	2050
	Gasturbinen-Kondensationskraftw.	0,0	0,0	0,0
Wärmeerzeugung außer KWK (SCOPE - endogen)	Dezentrale Gaskessel HH/GHD	69,7	27,8	0,0
	Dezentrale Ölkessel HH/GHD	6,0	0,0	0,0
	Müll-HKW – Fernwärme	1,5	0,6	0,0
	Gas -Industrie-Prozesswärme	36,8	25,2	0,0
	Braunkohle -Industrie-Prozessw.	2,2	0,2	0,0
	Steinkohle -Industrie-Prozessw.	41,8	18,5	0,0
	Öl -Industrie-Prozesswärme	14,3	7,5	0,0
	Ersatzbrennstoff -Industrie-PW	0,3	0,1	0,0
Verkehr	PKW	66,9	32,0	0,0
	LNF	6,2	3,2	0,0
	LZ/SZ ohne OH-Lkw	19,2	9,4	0,0
	OH-Lkw (Diesel-Anteil)	0,0	0,0	0,0
	Weitere Kraftstoffverbräuche im nationalen Verkehr	5,0	4,7	0,0
Sonstige energetische THG-Emissionen (SCOPE - exogen)	Umwandlungssektor u.a.	29,9	17,7	0,0
	Kraftstoffe GHD	7,1	5,9	0,0
Summe		388,7	167,9	0,0

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

5.2.2.2 Prozessbedingte THG-Emissionen der Industrie

Die prozessbedingten THG-Emissionen aus der Industrie betragen im Jahr 2050 insgesamt 10,4 Mio. t CO_{2Äq}. 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 46). In 2050 dominieren die THG-Emissionen der Zementindustrie die prozessbedingten THG-Emissionen mit 49,6 %, gefolgt von der Kalkindustrie (27 %). Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr.

Tabelle 46: Prozessbedingte Treibhausgasemissionen nach Industriesektoren in t CO₂Äq

Sektor	2030	2040	2050
Eisen- und Stahlindustrie	2.605.476	1.540.877	126.270
NE-Metallindustrie	999.370	608.419	0
Gießereiindustrie	0	0	0
Zementindustrie	8.544.392	7.299.855	5.178.690
Glasindustrie	731.084	577.302	352.192
Kalkindustrie	3.633.032	3.220.942	2.820.513
Textilindustrie	0	0	0
Nahrungsmittelindustrie	0	0	0
Papierindustrie	0	0	0
Chemie	6.407.898	3.559.097	0

Quelle: ifeu - eigene Berechnungen; Berechnungen enthalten keine energiebedingten THG-Emissionen

Die THG-Emissionen fluorierter Treibhausgase gehen bis 2050 auf insgesamt 1,2 Mio. t CO₂Äq zurück. Sie sind in Tabelle 47 detailliert ausgewiesen.

Tabelle 47: THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO₂Äq

	2030	2040	2050
Aluminium- und Magnesiumindustrie	195.963	208.612	171.610
Produktion fluorierter Treibhausgase	298.558	319.482	338.575
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	129.768	130.294	130.200
Halbleiterproduktion	135.934	135.879	135.667
Elektrische Betriebsmittel	166.000	115.000	51.031
Sonstige SF6-Anwendungen	464.000	253.918	253.918
Summe	1.770.449	1.364.411	1.192.523

Quelle: eigene Berechnungen, ifeu, auf der Basis von UBA (2014)

Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,76 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück, die einzelnen Quellen sind in Tabelle 48 ausgewiesen. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO₂Äq.

Tabelle 48: THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas int CO₂Äq

	2030	2040	2050
Anwendung von Farben und Lacken	359.424	328.872	254.396
Entfettung sowie Chemische Reinigung	59.063	55.789	47.614
Herstellung und Anwendung chemischer Produkte	87.868	82.951	70.684
Andere Anwendungen von Lösemitteln	526.238	486.604	389.424
sonstige Branchen (nicht im Bericht betrachtet)	99.667	69.767	0
Summe	1.132.260	1.023.983	762.118
Lachgas	13.000	13.000	13.000

Quelle: ifeu – eigene Berechnungen auf der Basis von UBA (2014)

5.2.2.3 Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft

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

Tabelle 49: Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft in t CO₂Äq

Landwirtschaft	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Tierhaltung / Verdauung	34.664.197	24.653.820	22.561.069	16.235.616	9.899.163
Wirtschaftsdüngermanagement	13.158.304	10.274.520	6.576.104	3.224.969	1.209.589
Böden	28.763.506	24.708.817	20.837.750	16.547.137	13.221.231
Kalkung	2.704.013	1.737.636	1.737.636	1.737.636	1.737.636
Harnstoffausbringung	479.601	587.408	495.639	449.754	403.870
Andere	393	1.052.329	181.711	0	0
Summe	52.389.910	38.195.113	52.389.910	38.195.113	26.471.489
Veränderung ggü. 1990		-21,0 %	-34,3 %	-52,1 %	-66,8 %

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

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 66,8 % in 2050 gegenüber 1990. Die größte absolute Änderung geht dabei auf die Tierhaltung zurück (-24,8 Mio. t CO₂Äq.), die größte prozentuale Änderung verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (-90,8 %).

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 50 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase der Quellgruppe Landwirtschaft nach Art der Treibhausgase.

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

	1990	2010	2030	2040	2050
Kohlendioxid	3.183.610	2.325.040	2.233.275	2.187.391	2.141.506
Methan	42.737.380	31.807.030	25.927.349	17.299.781	9.955.772
Lachgas	33.849.020	28.882.460	24.229.286	18.707.941	14.374.211

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

5.2.2.4 Emissionen der Abfallwirtschaft

Die THG-Emissionen im Abfallsektor sinken auf 2,9 Mio. t CO₂Äq in 2050. Tabelle 51 zeigt die weitere Aufschlüsselung nach Untergruppen im Zeitverlauf. Etwa die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen.

Tabelle 51: Treibhausgasemissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO₂Äq

Abfallsektor	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Deponie	34.250.000	10.675.000	3.083.333	1.483.333	700.000
MBA		156.000	133.568	119.482	93.052
Kompostierung/Vergärung	41.306	886.831	764.352	687.550	543.803
abflusslose Gruben	3.675.169	84.250	70.208	60.847	42.125
Kläranlagen		2.214.140	1.975.248	1.815.987	1.497.465
Summe	37.966.475	14.016.221	6.026.710	4.167.199	2.876.445

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

5.2.2.5 Emissionen LULUCF (ohne Wald)

Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Die folgende Tabelle 52 zeigt die THG-Emissionen der einzelnen Untergruppen in der Quellgruppe LULUCF. Die verbleibenden THG-Emissionen entstehen auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen, während der Torfabbau annahmegemäß rückläufig ist und ab 2040 nicht mehr stattfindet. Die unterstellte Senkenwirkung des Waldes ist im Kap. 5.2.1 nachrichtlich genannt.

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

LULUCF	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	1.018.500	0	0
Siedlungsfläche	1.885.560	3.267.200	3.011.333	2.840.889	2.500.000
Sonstiges	163	213			

LULUCF	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Summe (ohne Wald)	43.099.923	45.429.833	19.265.335	6.840.978	6.500.000

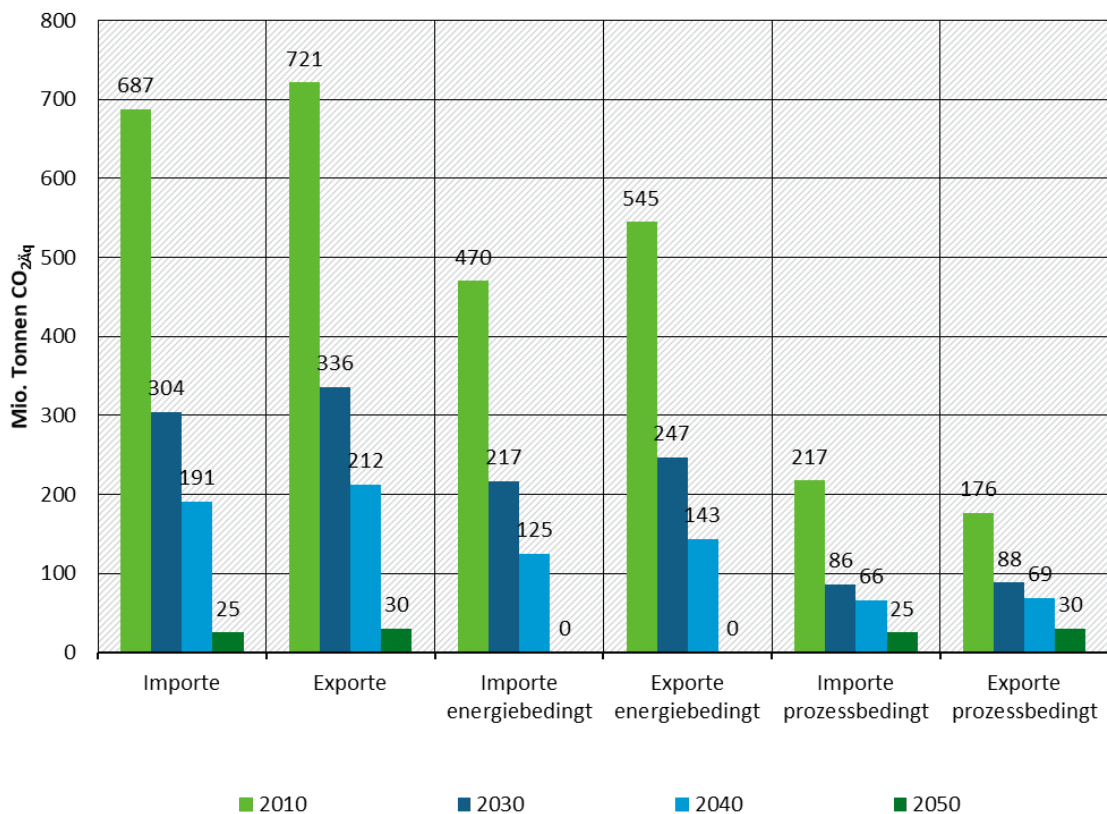
Quelle: (UBA 2019c) für 1990 und 2010, UBA (2014) für 2050, ifeu für 2030 und 2040

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

5.2.3 Emissionen einschließlich Vorketten

Die territoriale Emissionsberechnung wird ergänzt durch die Berechnung der THG-Emissionen, die bei Produktion und Transport der im- und exportierten Güter entstanden sind. Die Berechnung erfolgt nach dem UGR-Konzept. Dabei entsprechen die Güter der letzten inländischen Verwendung der Abgrenzung des Rohmaterialkonsums (RMC) und beinhalten den privaten und öffentlichen Konsum sowie die Investitionen. Die THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte sind bis 2050 rückläufig (Abbildung 17). In allen Jahren überwiegen die THG-Emissionsgehalte der Exporte die der Importe. Dies reflektiert bis 2040 insbesondere die hohe Energieintensität der Exporte. Aber auch die durchschnittlichen prozessbedingten Emissionsgehalte sind bei den Exporten aufgrund der Exportstruktur höher. Letztere entstammen sowohl den importierten Vorleistungen als auch der inländischen Produktion und sind dominiert von den Quellgruppen Landwirtschaft und Industrie.

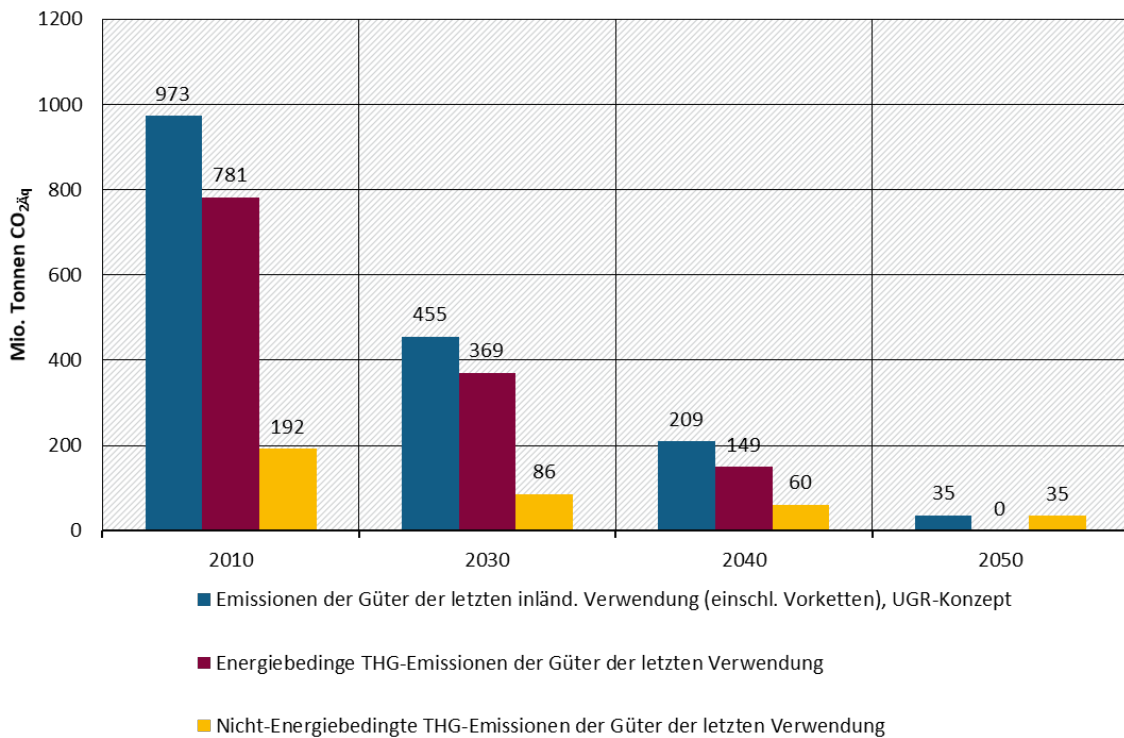
Abbildung 17: THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte, 2010 bis 2050



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

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit rückläufige THG-Emissionen. Diese liegen in 2050 [2030/2040] nur noch bei 35 [455/ 209] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von 96,4 % gegenüber 2010 entspricht (Abbildung 18). 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 weder im In- noch im Ausland entstehen.

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

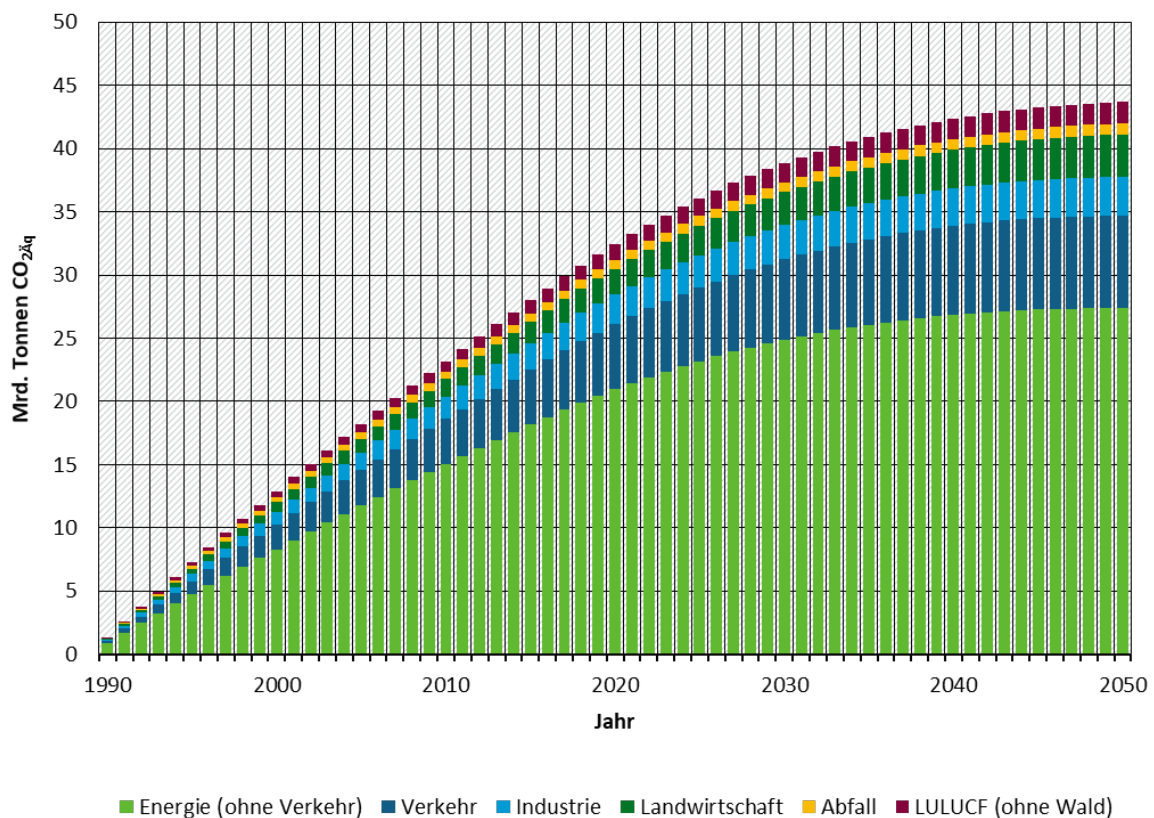


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse, ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.2.4 Kumulierte Treibhausgas-Emissionen

Die THG-Emissionen, die Deutschland zwischen 1990 und 2016 (nach NIR) emittiert hat, summieren sich auf insgesamt 28,96 Mrd. t CO_{2Äq}. Bis 2050 kommen im Szenario GreenEe weitere 14,72 Mrd. t CO_{2Äq} hinzu (Abbildung 19). Der Großteil von 9,88 Mrd. t CO_{2Äq} entsteht im Zeitraum bis 2030. 62,2 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt (ohne Verkehr), 16,7 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,1 % und auf die Landwirtschaft 7,7 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050.

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



Quellen: eigene Darstellung und 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 CO₂ im Wald gebunden. Dies entspricht einem Anteil von 4,6 % der emittierten THG-Emissionen der kumulierten THG-Emissionen zwischen 2010 und 2050. Eine genaue Quantifizierung wurde nicht vorgenommen, es ist davon auszugehen, dass die Senkenfunktion größer ausfällt.

5.2.5 Vergleich der Treibhausgasemissionen mit den GreenEe-Szenarien

Aufgrund der höheren Materialeffizienz und des geringeren Handelsüberschusses im Vergleich zu GreenEe und der daraus folgenden geringeren Produktionsmengen entstehen im GreenMe-Szenario weniger Treibhausgas-Emissionen als im GreenEe bzw. GreenEe2-Szenario. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 4,6 % [8,1 %/14,3 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1. Der relevanteste Unterschied von 6,4 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 (14,3 Mio. t CO_{2Äq} in 2030 / 15,2 Mio. t CO_{2Äq} in 2040) geht auf die Verringerung der Handelsüberschüsse zurück. Die höhere Materialeffizienz führt zu einem weiteren Rückgang von 1,3 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 (1,7 Mio. t CO_{2Äq} in 2030 / 2,3 Mio. t CO_{2Äq} in 2040), besonders ausgeprägt bei den nicht-energetischen THG-Emissionen in der Industrie. (Tabelle 53)

Tabelle 53: Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenMe im Vergleich zu GreenEe2 in Tsd. Tonnen CO₂Äq

	GreenMe			GreenEe2			GreenMe ggü. GreenEe in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Energie ohne Verkehr	288.894	119.433	0	296.604	119.677	0	-1,76	-0,98	
Verkehr	97.329	49.377	0	99.725	52.114	0	-2,40	-5,25	
Industrie	25.837	19.208	10.445	27.525	20.843	11.733	-6,13	-7,84	-10,97
Landwirtschaft	52.390	38.195	26.471	52.390	38.195	26.471	0,00	0,00	0,00
Abfall	6.027	4.167	2.876	6.045	4.192	2.903	-0,30	-0,59	-0,91
LULUCF*	19.265	6.841	6.500	19.265	6.841	6.500	0,00	0,00	0,00
Summe	489.742	237.221	46.292	501.555	241.862	47.607	-1,86	-2,30	-2,76

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG; *ohne Wald

5.3 Die Inanspruchnahme 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 439,5 [829,8/ 629,4] Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente (RME). Dies ist ein Rückgang um 68,0 [39,6/ 54,2] % gegenüber 2010 (Tabelle 54).

Im Jahr 2050 haben die mineralischen Rohstoffe massenmäßig den größten Anteil von 52,1 % am RMC, gefolgt von biotischen Rohstoffen (36,2 %) und Metallerzen (11,7 %).

Tabelle 54: Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010, 2030, 2040 und 2050 in Mio. t RME

		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
2010						
Primärrohstoffe	Mio. t RME	1.021,3	1.669,3	2.690,6	1.316,1	1.374,5

		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
Biomasse	Mio. t RME	249,2	173,5	422,7	157,2	265,5
Metallerze	Mio. t RME	0,4	663,7	664,1	502,0	162,1
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	575,6	262,3	837,9	276,8	561,1
Fossile Energieträger	Mio. t RME	196,1	569,8	765,8	380,1	385,7

2030

Primärrohstoffe	Mio. t RME	721,1	995,7	1716,8	887,0	829,8
Biomasse	Mio. t RME	226,8	152,5	379,4	167,4	211,9
Metallerze	Mio. t RME	0,3	577,5	577,8	450,3	127,5
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	461,2	141,2	602,3	204,3	398,0
Fossile Energieträger	Mio. t RME	32,7	124,5	157,2	65,0	92,3

2040

Primärrohstoffe	Mio. t RME	585,4	750,1	1335,4	706,0	629,4
Biomasse	Mio. t RME	198,0	138,4	336,3	154,3	182,0
Metallerze	Mio. t RME	0,3	411,4	411,6	322,4	89,3
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	387,0	118,2	505,2	187,8	317,4
Fossile Energieträger	Mio. t RME	0,2	82,1	82,3	41,5	40,8

2050

Primärrohstoffe	Mio. t RME	483,8	501,7	985,6	546,0	439,5
Biomasse	Mio. t RME	178,8	103,3	282,1	122,9	159,2
Metallerze	Mio. t RME	0,2	298,3	298,5	247,0	51,5

		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	304,9	100,1	405,0	176,1	228,8
Fossile Energieträger	Mio. t RME	0	0	0	0	0

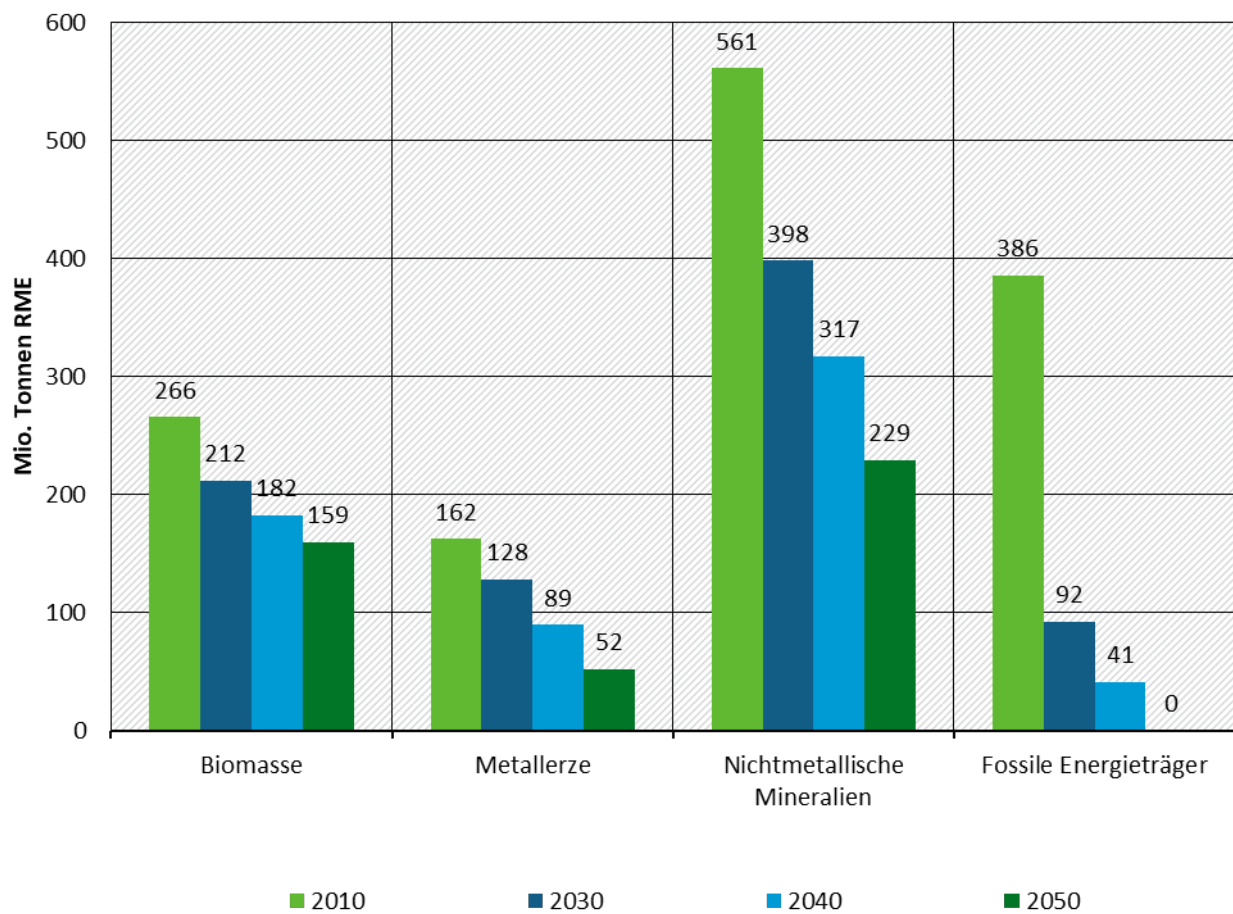
Quelle: ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die im Zuge der in GreenMe beschriebenen Transformation um 100 % zurückgehen (Abbildung 20). Der Rückgang ist zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (76,1 %). Weder im Inland noch im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 fossile Energieträger verwendet. Damit liegt der Materialrucksack der Importe bei den fossilen Energieträgern bei Null.

Der RMC für Metallerze vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 68,2 %. Zu diesem starken Rückgang tragen die Recyclingquoten, die Substitutionen durch Leichtbaumaterialien und biotische Rohstoffe sowie die hohen Materialeffizienzanstrengungen und rohstoffleichte, langlebige Technologien bei.

Der drittstärkste Rückgang bis 2050 (59,2 %) ist bei den nicht-metallischen mineralischen Rohstoffen zu verzeichnen. Der Rückgang des RMC verläuft bei den mineralischen Rohstoffen relativ stetig, ein wichtiger Faktor ist die rückläufige Nachfrage aus dem Hoch- und Tiefbau. Der RMC für Biomasse geht zwischen 2010 und 2050 um insgesamt 40,1 % zurück. Wichtige Gründe sind die Umstellung der Diät, keine Nutzung von Primärbiomasse für energetische Zwecke ab 2030 und die steigende Materialeffizienz. Der Rückgang der Inanspruchnahme von Biomasse ist im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien geringer ausgeprägt. Dies ist auf die Inanspruchnahme von Biomasse, vor allem Holz, als Substitut von abiotischen Rohstoffen zurückzuführen.

Abbildung 20: Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050

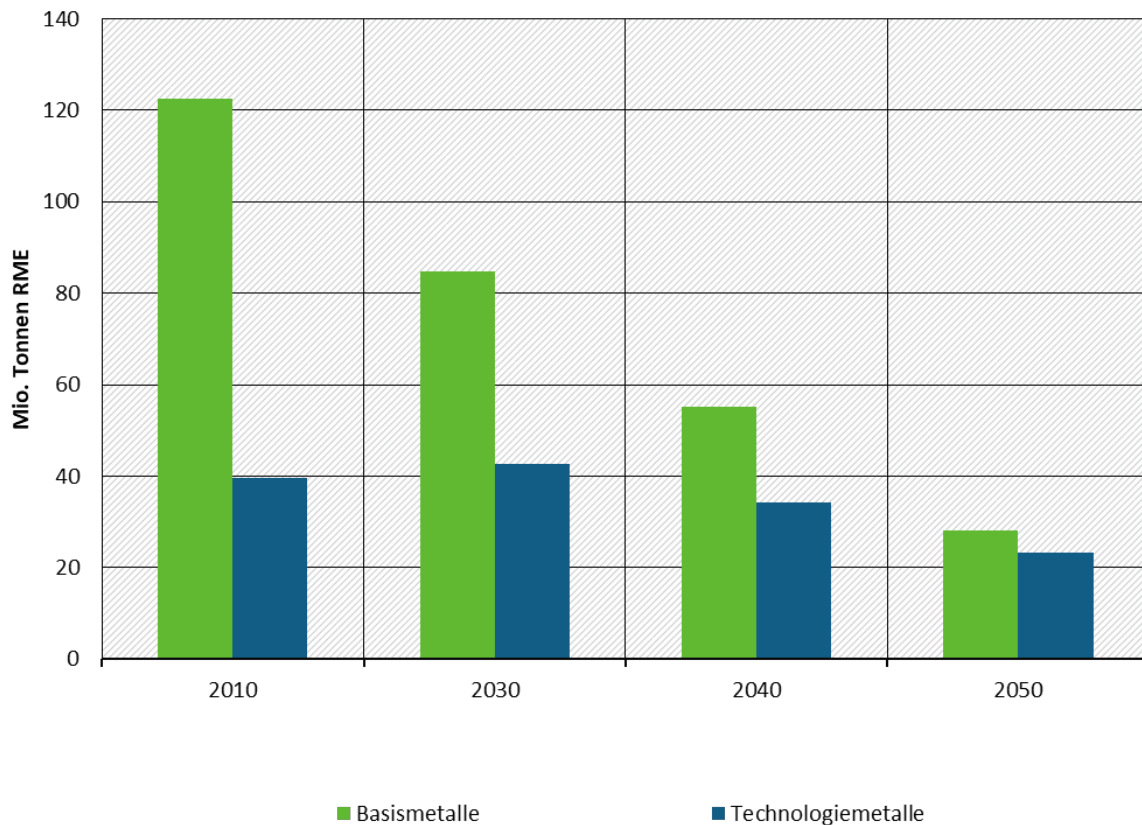


Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der im Zeitverlauf kontinuierliche Rückgang des RMC der Metallerze verdeckt, dass innerhalb der Gruppe der Metalle deutliche Verschiebungen stattfinden. Die Basismetalle Eisen, Kupfer und Aluminium stellen in 2010 im RMC in der Gruppe der Metalle den weitaus größten Anteil von 75,6 %, während ihr Anteil in 2050 nur noch bei 54,8 % liegt (Abbildung 21). Dabei ist die nachgefragte Menge nach Basismetallen aufgrund der oben genannten Gründe rückläufig. Gleichzeitig steigt die Nachfrage nach Technologie- und Edelmetallen, die unter anderem in der Energieinfrastruktur benötigt werden, bis 2030 an und geht bis 2050 wieder zurück⁴. Eine relevante Nachfrage nach Technologie- und Edelmetallen geht auf den Bau von Anlagen zur Erzeugung von erneuerbaren Energien zurück.

⁴ 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 der Abbildung sind alle Metalle außer Eisen, Kupfer und Aluminium unter Technologie- und Edelmetallen zusammengefasst.

Abbildung 21: Letzte inländische Verwendung der Primärbasis- und Technologie- bzw. Edelmetalle, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, Ifeu/IEE/SSG – URMOD; Basismetalle umfassen Eisen, Kupfer und Aluminium, alle anderen Metalle sind in der Kategorie Technologie- und Edelmetalle enthalten.

5.3.1.2 Die Veränderung der Rohstoffproduktivität

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

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

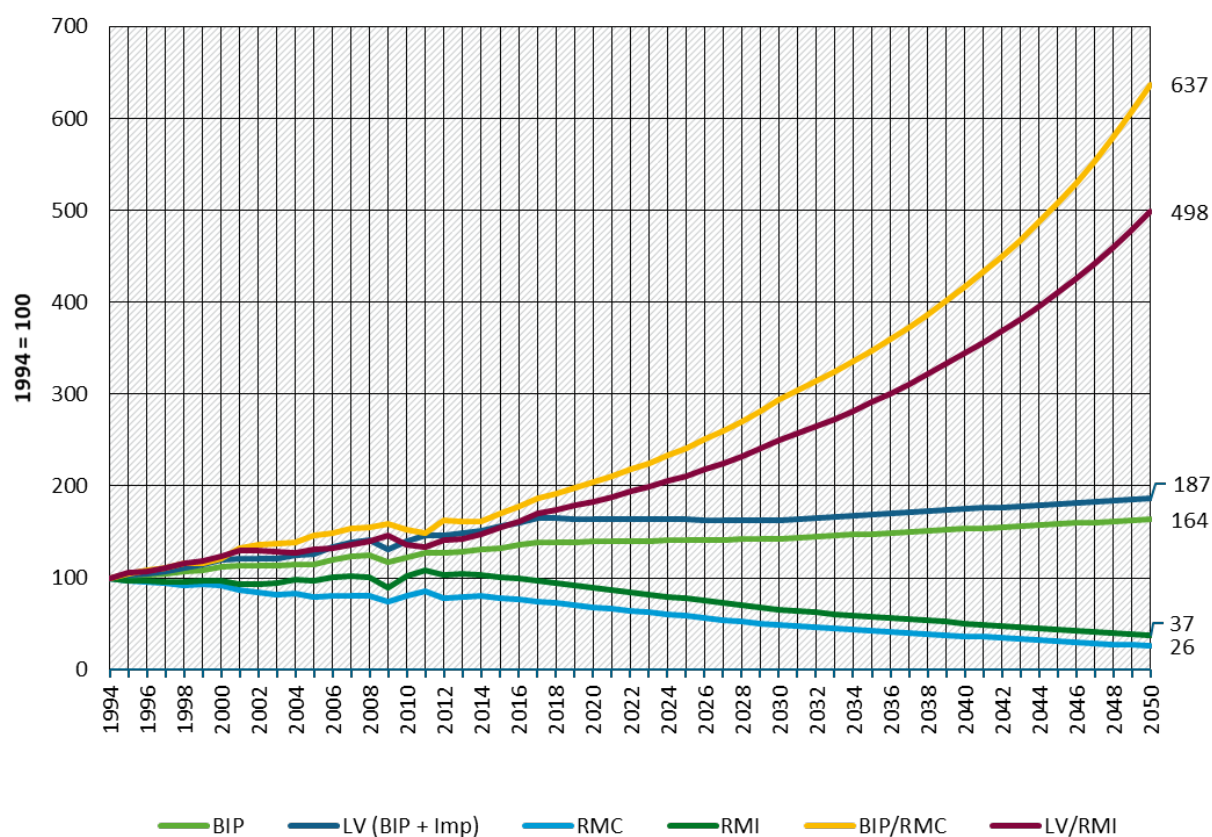
Der international eher übliche Indikator ist die Rohstoffproduktivität (BIP/DMC bzw. BIP/RMC). Die Gesamtrohstoffproduktivität ist in Deutschland ein Zielindikator.

Abbildung 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 2050 entspricht der für das Projekt getroffenen Annahme. Während das BIP im Zeitablauf steigt, vermindert sich der RMC kontinuierlich. Der RMI bewegt sich zwischen 1994 und 2016 in etwa auf gleichem Niveau. Diese Entwicklung spiegelt wider, dass die Importe und Exporte in diesem Zeitraum deutlich stärker gestiegen sind als das BIP. Der starke Importanstieg schlägt sich im RMI nieder, während die Effekte steigender Importe und Exporte sich beim Indikator RMC weitgehend ausgleichen. Für den Zeitraum nach 2016 wurde dagegen ein geringerer Anstieg der Außenhandelsverflechtung unterstellt. Daher sind für diesen Zeitraum die Entwicklungen von RMI und RMC recht ähnlich.

Die Gesamtrohstoffproduktivität (LV/RMI) liegt in 2050 um 298 Indexpunkte höher als im Jahr 1994. Die Rohstoffproduktivität, gemessen als Verhältnis zwischen BIP und RMC, steigt um 537 Indexpunkte im Vergleich zu 1994.

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

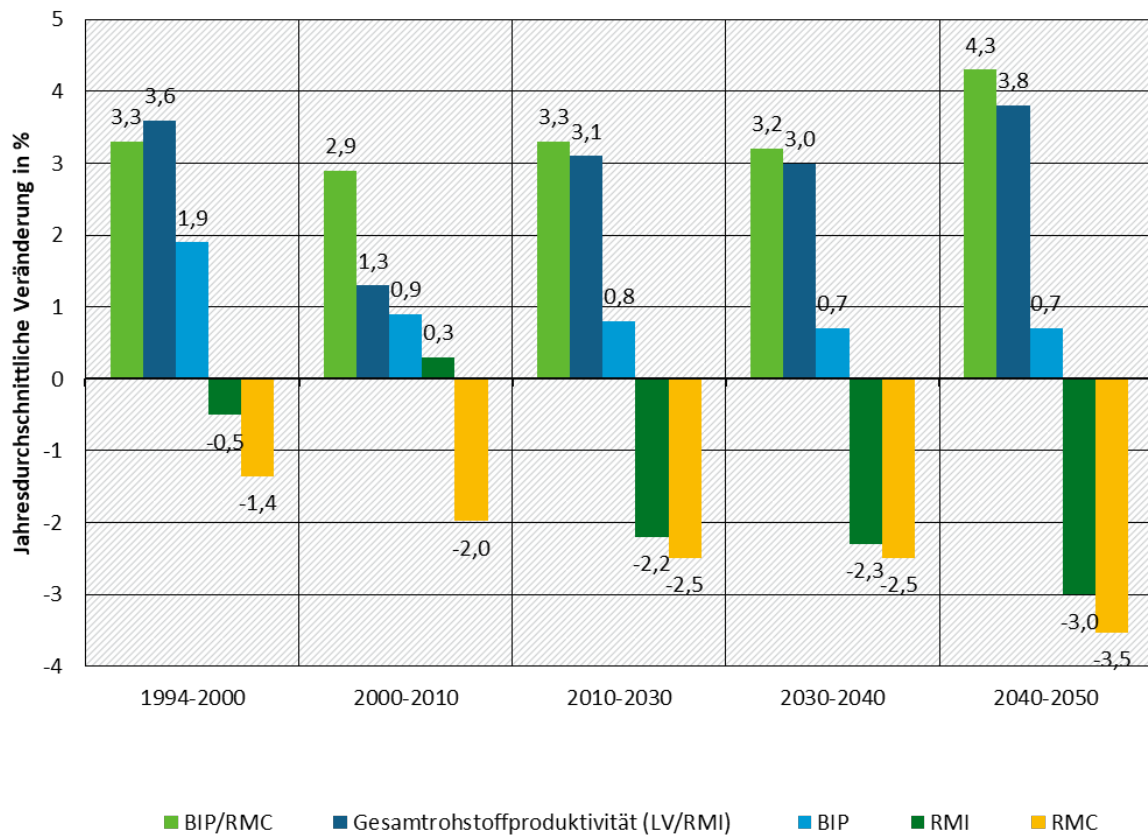


Quelle: ifeu/IEE/SSG – URMOD für 2010, 2030, 2040 und 2050, verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA, (Destatis 2018)). Ab 2016 lineare Interpolation zwischen den Stützjahren und dem Zieljahr.

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 und -2,7 % 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 3,1 bzw. 3,0 % pro Jahr und ab 2040 durchschnittlich um 3,8 % pro Jahr. Die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität ist somit über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRes II und

ProgRess III (BMU 2020; BMUB 2016b) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2018).

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

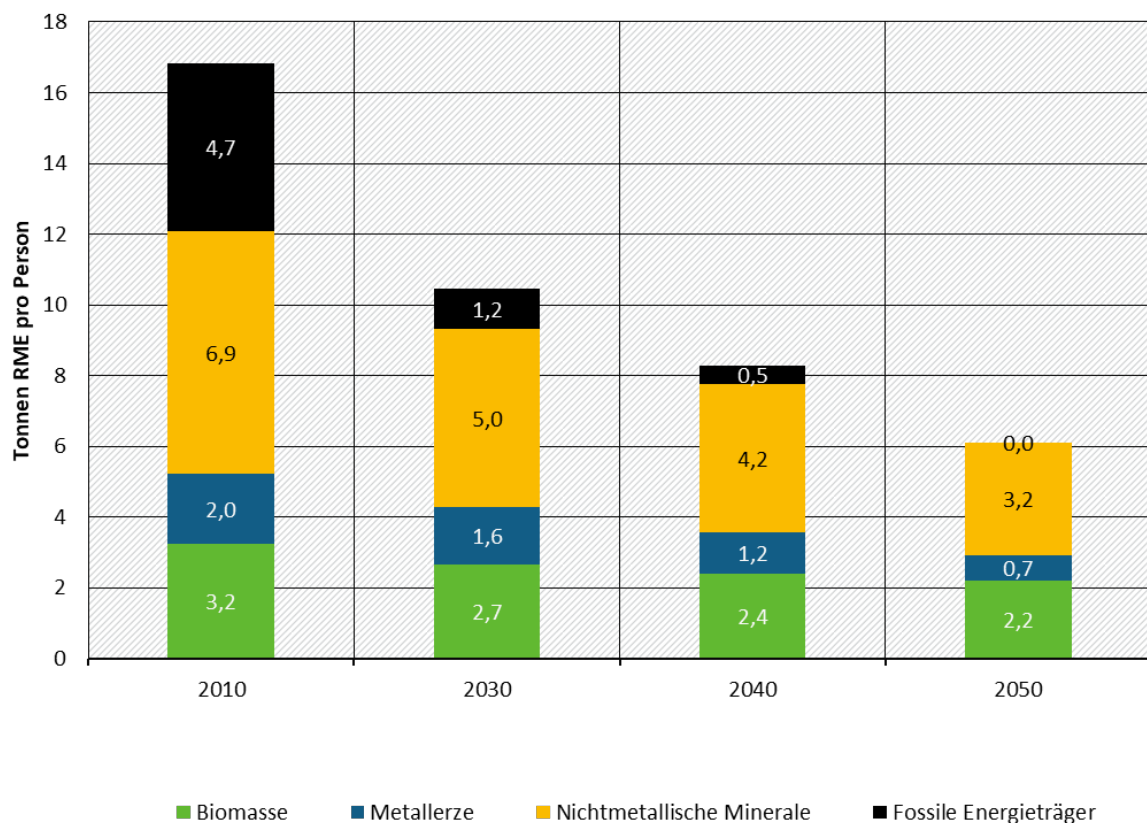


Quellen: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - URMOD für 2010, 2030, 2040 und 2050 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA (Destatis 2018)). Zwischen den Stützjahren lineare Interpolation.

5.3.1.3 Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum in 2050

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen beläuft sich im Jahre 2050 auf 6,1 Tonnen p.a., was mehr als einer Halbierung im Vergleich zu 2010 entspricht (-63,6 %) (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 ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der Pro-Kopf-Konsum von primärer Biomasse verringert sich zwischen 2010 und 2050 von 3,2 auf 2,2 Tonnen. Dies ist eine Größenordnung, die auch in Ländern mit einem geringen Anteil tierischer Produkte in der Nahrung gemessen wird. Der Wert für Metalle (0,7 Tonnen) liegt unter anderem aufgrund der Recyclinganstrengungen bei den Massenmetallen unter dem gegenwärtigen globalen Durchschnitt von 1,1 Tonnen pro Person (UNEP 2016). Der Konsum von nicht-metallischen mineralischen Rohstoffen (3,2 Tonnen) liegt unter der Höhe des gegenwärtigen globalen Durchschnittswertes von 4,4 Tonnen pro Person. Die Höhe zeigt vor allem, welche Materialinputs weiterhin für die Aufrechterhaltung der überwiegend auf nicht-metallischen Mineralen basierten Technosphäre benötigt werden.

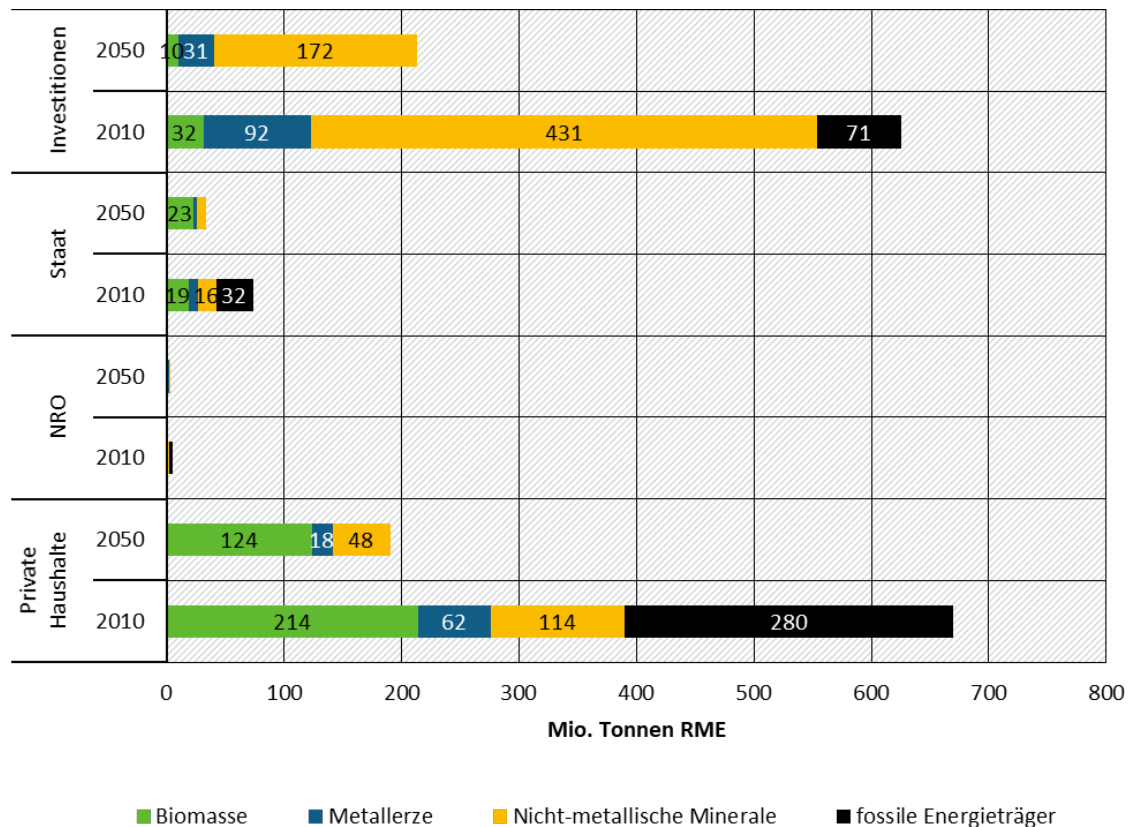
5.3.1.4 Der Rohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfelder in 2050

In 2050 werden rund 213 Millionen Tonnen Rohstoffe (in Rohmaterialäquivalenten (RME)) in Bauwerken, Infrastrukturen und Anlagen investiert, das heißt längerfristig gebunden (Abbildung 25). Die Investitionen werden von nicht-metallischen Mineralen dominiert, die 90,8 % der Rohstoffe der Investitionen ausmachen. Weitere 14,43 % der Rohstoffaufwendungen sind Metallerze, der Anteil der Biomasse ist insgesamt gering (4,8 %). Im Vergleich zu 2010 sinkt die Primärrohstoffinanspruchnahme um 66,0 %.

Die privaten Haushalte konsumieren 191 Millionen Tonnen Rohstoffe. Den größten Anteil stellt die Biomasse mit 65,1 %, gefolgt von nicht-metallischen Mineralen (25,4 %) und Metallerzen (9,5 %). Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte geht damit um 71,6 % im Vergleich zu 2010 zurück.

Der Konsum des Staates und der Nichtstaatliche Organisationen ist vergleichsweise gering mit 33,6 bzw. 2,5 Millionen Tonnen. Dies entspricht einem Rückgang von 54,8 bzw. 50,0 % gegenüber 2010.

Abbildung 25: Der RMC nach Verwendungskategorien, 2010 und 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, 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 (50,93 %). Zum Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus, das 19,0 % 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 (87,2 %), abiotische Rohstoffe werden unter anderem für Düngemittel, Haltbarmachung, Zubereitung oder Verpackung der Lebensmittel benötigt. Im Vergleich zu 2010 sinkt der Rohstoffkonsum im Bedürfnisfeld Ernährung bzw. Freizeit und Tourismus um 51,7 % bzw. 53,2 %.

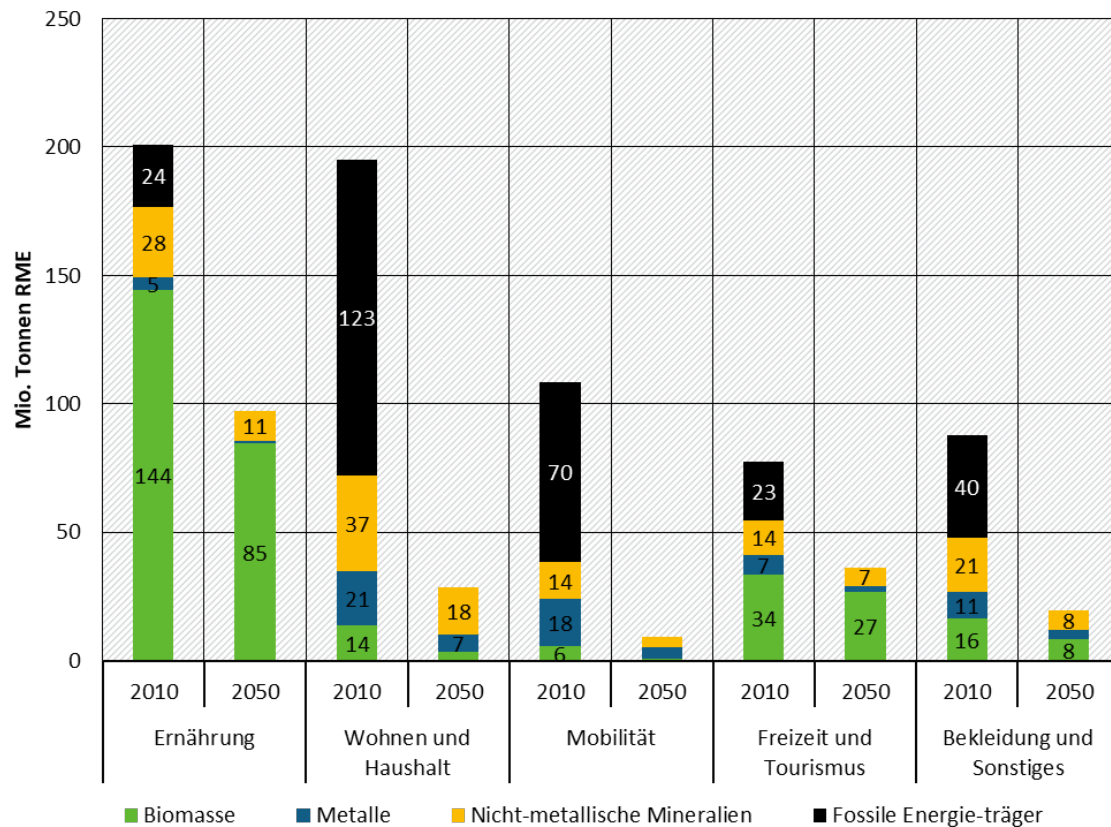
Im Bereich Haushalt und Wohnen werden Rohstoffe nicht nur für Möbel, sondern auch für Reparaturen (z.B. Badsanierung u. ä.) benötigt, wodurch sich der hohe Anteil nicht-metallischer Minerale erklärt. Der Wohnungsbau ist jedoch hier nicht berücksichtigt, da er eine Investition darstellt und dort verortet wird. Insgesamt fragen die privaten Haushalte in dieses Bedürfnisfeld 14,9 % ihres Rohstoffkonsums nach. Im Vergleich zu 2010 werden 85,4 % weniger Primärrohstoffe in diesem Bedürfnisfeld nachgefragt.

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). Dies entspricht einem Rückgang gegenüber

2010 von 91,3 %, insbesondere verursacht durch den Rückgang der Nachfrage nach fossilen Rohstoffen für Verbrennungsmotoren.

Die Aufwendungen für Kleidung und sonstige Waren liegen bei 10,2 % des privaten Konsums, ein Rückgang von 77,9 % gegenüber 2010.

Abbildung 26: Der Konsum der privaten Haushalte nach Bedürfnisfelder, 2010 und 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG – URMOD; Werte unter 5 werden nicht angezeigt.

Pro Person und Jahr werden damit in den Bedürfnisfeldern

- Ernährung: 1,35 Tonnen
- Wohnen und Haushalt: 0,4 Tonnen
- Mobilität: 0,13 Tonnen
- Freizeit und Tourismus: 0,5 Tonnen und
- Bekleidung und Sonstiges: 0,27 Tonnen

Rohmaterialien konsumiert.

5.3.1.5 Der kumulierte Primärrohstoffkonsum

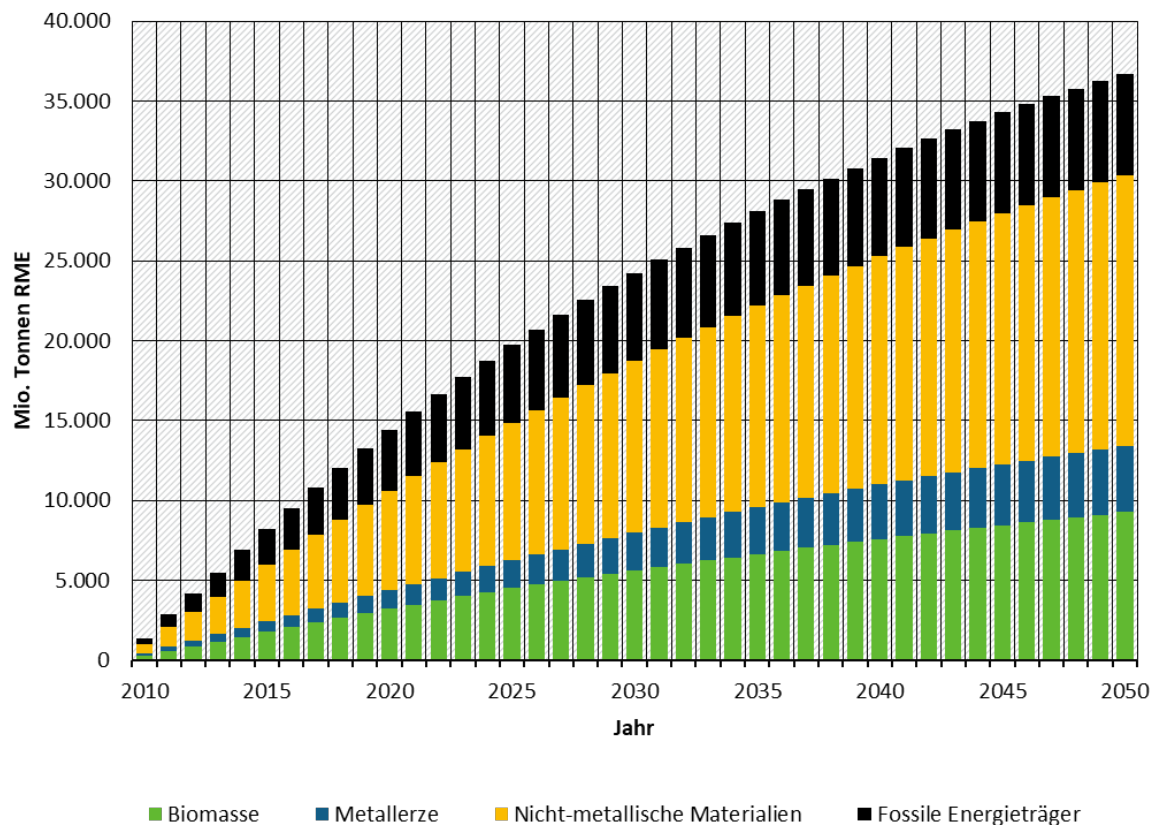
Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen (LIV) auf insgesamt 36,688 Mrd. Tonnen (Abbildung 27). Den größten Anteil daran haben die nicht-

metallischen Mineralien (46,3 %), gefolgt von biotischen Materialien (25,3 %) und fossilen Rohstoffen (17,3 %).

24,2 Mrd. Tonnen werden im Zeitraum zwischen 2010 und 2030 konsumiert bzw. investiert. Zwischen 2030 und 2050 summieren sich die Primärrohstoffe auf 12,4 Mrd. Tonnen.

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

Abbildung 27: Kumulierter Primärrohstoffkonsum (LIV), 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.1.6 Substitution von Primärrohstoffen

In GreenMe liegt der Einsatz von Primärrohstoffen (RMC) im Jahr 2050 um insgesamt 935 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.

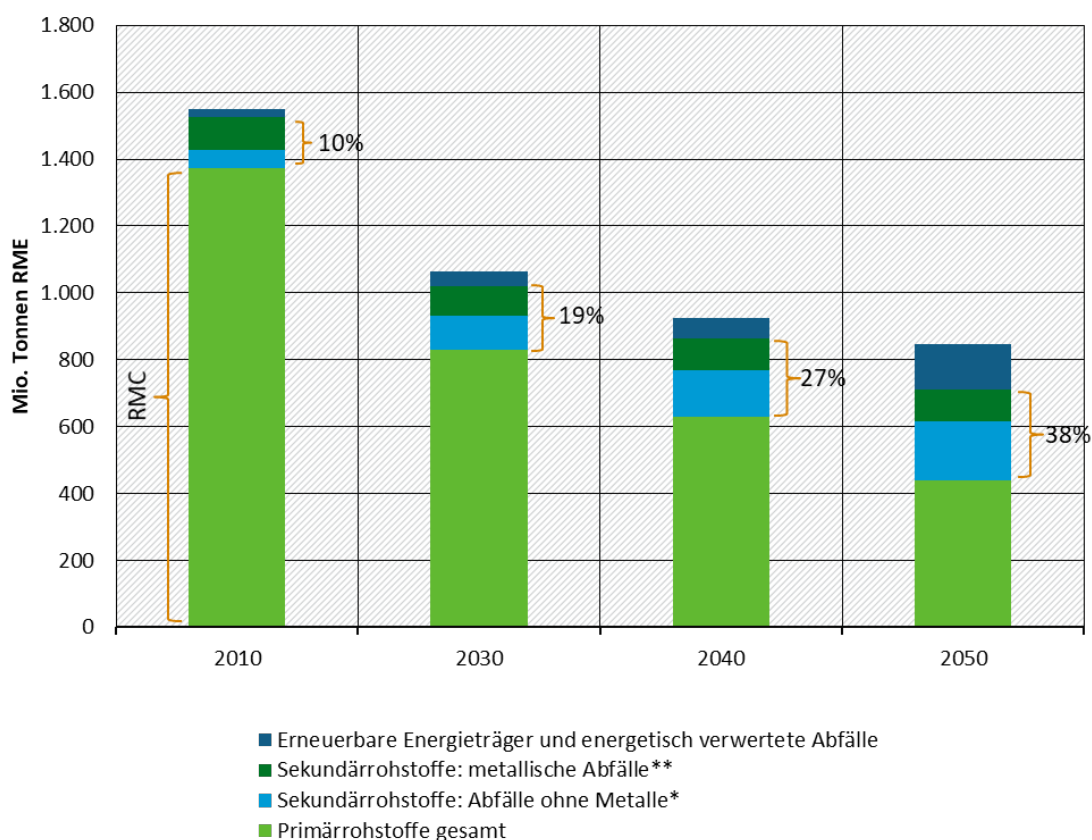
Aufgrund der Substitution werden im Jahr 2050 im Vergleich zu 2010 Primärrohstoffe in Höhe von insgesamt 406 Mio. Tonnen eingespart. Diese Abschätzung ist eine Mindestabschätzung, da bei der Berechnung nicht alle stofflich verwerteten Abfälle vollständig einbezogen werden

konnten. Berücksichtigt wurden die in Kapitel 3 und 4 genannten Annahmen zu Eisen, Kupfer, Aluminium, Papier, Altholz und Kunststoffe sowie Sekundärbaustoffe.

Die Substitution der fossilen Energieträger beläuft sich auf insgesamt 136,9 Mio. Tonnen RME Öläquivalenten, das sind 112 Mio. Tonnen mehr als in 2010. Aufgrund von Recycling wurden 270,3 Mio. Tonnen RME substituiert, insgesamt 105 Mio. Tonnen mehr als 2010.

Abbildung 28 zeigt den Gesamtrohstoffaufwand einschließlich der Primär- und Sekundärrohstoffe sowie der substituierten fossilen Energieträger. Der Anteil der Sekundärrohstoffe (Abfälle) am Gesamtrohstoffaufwand als ein Maß für die Zirkularität der gesamten Volkswirtschaft liegt somit bei 38 % in 2050. Es soll noch einmal betont werden, dass nicht alle Sekundärrohstoffe, insbesondere nicht alle Metalle, in dieser Rechnung einbezogen sind und somit der Anteil der Sekundärrohstoffe insgesamt unterschätzt ist.

Abbildung 28: Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 – 2050



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

5.3.2 Rohstoffinanspruchnahme ausgewählter Rohstoffe

5.3.2.1 Primär- und Sekundäreinsatz von Eisen, Kupfer und Aluminium

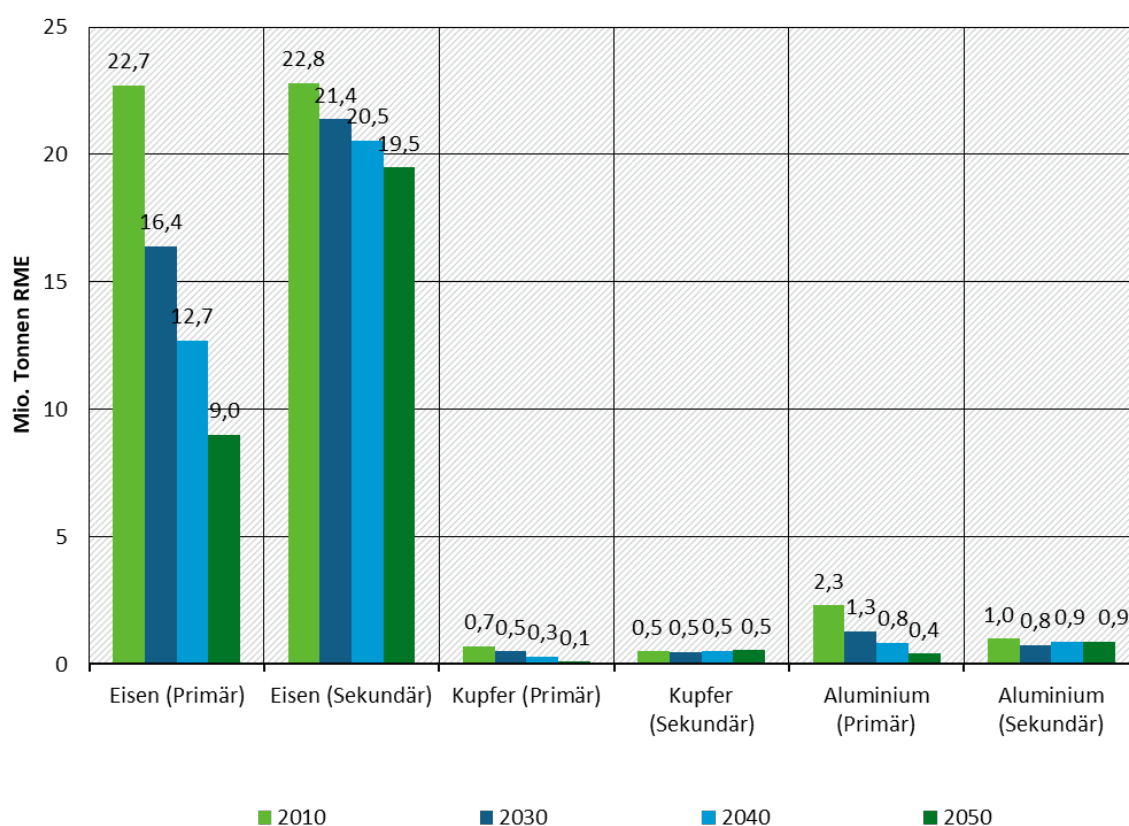
Der Einsatz (in der Abgrenzung des RMC) der primären Basismetalle ist in GreenMe bis 2050 rückläufig (siehe auch Abbildung 21). Im Gegensatz dazu steigt die Nutzung von Sekundärmetallen. In den folgenden Angaben sind die Im- und Exporte vollständig verrechnet, einschließlich der Metallanteile, die sich in Halbwerten und Endprodukten befinden. Die Metalle werden in Metallgehalten ausgedrückt.

Sowohl die Primär- als auch der Sekundäreiseninanspruchnahme ist rückläufig. Aufgrund der erhöhten Recyclingrate in 2050 gegenüber 2010 verändern sich die Anteile von Primäreisen im Vergleich zu Schrotten. Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen erfordern in 2050 insgesamt 28,5 Mio. Tonnen Eisen, davon 9 Mio. Tonnen Primäreisen und 19,5 Mio. Tonnen Eisenschrott (Abbildung 29).

Auch die für Konsum und Investitionen benötigten Mengen Kupfer sind rückläufig. Aufgrund der Annahmen zu steigenden Recyclingraten bleibt im Ergebnis die verbrauchte Menge Kupferschrott nahezu konstant. Der Rückgang der Nachfrage wirkt sich insbesondere auf die Primärkupfermenge aus, die in 2050 nur noch 0,1 Mio. Tonnen beträgt.

Ähnlich verläuft das Ergebnis für Aluminium. Auch hier zeigt der Verbrauch von Sekundäraluminium nur einen leichten Rückgang aufgrund des gestiegenen Sekundäranteils, während der Verbrauch von Primäraluminium stark rückläufig ist. Auffallend ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030, der zwei Ursachen hat: zum einen sinkt die Nachfrage ähnlich wie bei den Basismetallen Eisen und Kupfer, auch wenn Aluminium als Substitut für Eisen und für Kupfer eingesetzt wird. Hinzu kommen jedoch auch Unterschiede bei der Produktion und dem Einsatz von Aluminium bei den importierten Vorprodukten aus Europa, die sich als Folge der Annahme, dass sich in europäischen Ländern die Produktionsweisen an die deutsche angleichen, im Falle von Aluminium im Ergebnis niederschlagen. Durch die angenommenen Änderungen der Produktionsweisen in Europa und auch im Rest der Welt sinkt die Aluminiummenge (primär und sekundär) in den Importen.

Abbildung 29: Primär- und Sekundärbasismetallmengen in der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.2.2 Primäreinsatz ausgewählter Technologie- und Edelmetalle

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

So wurde die gesamtwirtschaftliche Nachfrage (in der Abgrenzung des RMC bzw. der letzten inländischen Verwendung) nach Zink, Blei, Platingruppenmetallen, Magnesium, Chrom und Nickel berechnet. Die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ausgewiesenen Mengen zeigen die Primärmetallgehalte, die im Konsum und in den Investitionen in Deutschland verbleiben. Der internationale Handel ist vollständig verrechnet. Im Rahmen des Projekts konnten keine Analysen zum Einfluss einzelner Faktoren durchgeführt werden, daher kann keine exakte Aussage zu Gründen der Nachfrageänderung getroffen werden, sondern nur allgemeine Einflussfaktoren genannt werden.

Die Nachfrage (LIV) nach allen ausgewählten Metallen ist rückläufig (Tabelle 55). Verschiedene Faktoren wirken dabei zusammen, darunter die sinkende Nachfrage nach Gebäuden und nicht-energiebedingten Infrastrukturen aufgrund der rückläufigen Bevölkerung und der rückläufigen Siedlungsneuentwicklung. Dies wirkt sich unter anderem auch auf Metalle aus, die zu erheblichen Anteilen als Stahlveredler eingesetzt werden. Weiterhin sind auch die ansteigende Effizienz in der Produktion sowie die in Kapitel 3 und 4 aufgeführten technologischen Veränderungen ursächlich für den Rückgang der ausgewählten Metalle zu nennen.

Tabelle 55: Inländische Nachfrage nach ausgewählten Metallen, 2030, 2040 und 2050

		2030	2040	2050
Zink	Tsd. t Metallgehalt	333	221	83
Blei	Tsd. t Metallgehalt	100	56	16
Zinn	Tsd. t Metallgehalt	8	7	0
PGM	t Metallgehalt	24	21	17
Silber	t Metallgehalt	271	225	171
Magnesium	Tsd. t Metallgehalt	14	12	9
Chrom	Tsd. t Metallgehalt	74	58	51
Nickel	Tsd. t Metallgehalt	37	27	17

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – URMOD

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

Die Dynamik der nachgefragten Mengen nach Siliziummetallen reflektiert die Mengen, die für Neuanlagen bzw. für den Ersatz von alten PV-Anlagen erforderlich sind. Die Nachfrage ist im Pfad durchweg hoch. Die Nachfrage nach Lithium, Graphit und Kobalt ist etwas unterschiedlich. Lithium wird aufgrund der Verbreitung der Elektromobilität stark nachgefragt, insbesondere in 2040 und 2050. Graphit und Kobalt werden in 2030 und 2040 nachgefragt, aufgrund der Entwicklung neuer Batterietechnologien in 2050 jedoch nicht mehr benötigt.

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

		2030	2040	2050
Siliziummetall ¹	t Metallgehalt	17.758	23.073	18.289
Lithium ²	t Metallgehalt	2.233	18.300	16.431
Graphit ²	t Metallgehalt	34.939	34.122	0
Kobalt ²	t Metallgehalt	6.394	6.245	0

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

5.3.2.3 Der Einsatz von Holz

Holz wird gegenwärtig sowohl stofflich als auch energetisch genutzt. In GreenMe wird Primärbiomasse wie in allen Green-Szenarien ab 2030 nicht mehr energetisch genutzt, dies reduziert die Primärholzmenge signifikant. Holz wird in GreenMe jedoch als Substitut für abiotische Rohstoffe genutzt, besonders relevant ist der Wohngebäudebereich. Die Nachfrage aus diesem Bereich steigt im Vergleich zum GreenEe-Szenario insbesondere im Pfad. Im zeitlichen Verlauf des GreenMe-Szenarios sinkt die vom Gebäudebereich nachgefragte Holzmenge wieder aufgrund der rückläufigen Nachfrage nach Neubauten. Weiterhin sinkt die Nachfrage nach Holzprodukten, darunter Papier und Pappe, aufgrund des starken Anstiegs der Ressourceneffizienz bei allen Verpackungen sowie in allen Dienstleistungsbereichen.

Die teilweise gegenteilig laufenden Effekte führen insgesamt zu einem sinkenden inländischen Bedarf von Primärholz zwischen 2010 und 2050 in der Abgrenzung des RMC bzw. der letzten inländischen Verwendung. Der Bedarf geht bis 2050 [2030/2040] um -49,6 % [-25,6 %/-38,3 %] auf rund 16,6 [24,5 / 20,3] Mio. Tonnen RME zurück. Auch in diesen Angaben sind die Im- und Exporte miteinander verrechnet.

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 auf den Verbrauch von dieser Rohstoffgruppe zurück. Gleichzeitig ist die konkrete Mengenangabe mit Unsicherheiten behaftet, da die empirischen Daten nicht ausreichen erfasst werden.

Im GreenMe-Szenario sinkt der Bedarf bis 2050 auf 175 Mio. Tonnen, dies ist ein Rückgang von 60,7 % gegenüber 2010. Die Änderung ist bis 2030 stärker (-29,5 %) und verläuft dann stetig (-44,1 % 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. Die zeitliche Dynamik reflektiert unter anderem die Substitution des Betons durch Holz, die in 2030 aufgrund der Bautätigkeit stärker ausgeprägt ist. Im beispielhaften Vergleich zu GreenEe1 wird 23,6 % weniger Sand, Kies und Schotter in 2050 gebraucht.

5.3.2.5 Knappheit und Versorgungsgaps 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 werden, und keine Prognosen erstellt werden. Alle RESCUE-Szenarien gehen von einer sehr optimistischen Transformation im Rest der Welt aus. Dies bedeutet, dass in GreenMe ebenso wie in GreenSupreme implizit unterstellt wird, dass Menschen außerhalb Deutschlands dieselben Technologien einsetzen und etwa dieselbe pro-Kopf Nachfrage nach den Rohstoffen wie Deutschland haben. Daher ist der Vergleich der Nachfrage pro-Kopf-Mengen mit den Produktionsmengen bzw. kumuliert mit Reserven bzw. Ressourcen in diesem Fall sinnvoll, um zukünftige Knappheit zu ermitteln. Eine Prognose – was RESCUE nicht ist – würde wahrscheinliche Entwicklungen z.B. bezüglich Technologieänderungen und Reaktionen des Marktes einbeziehen.

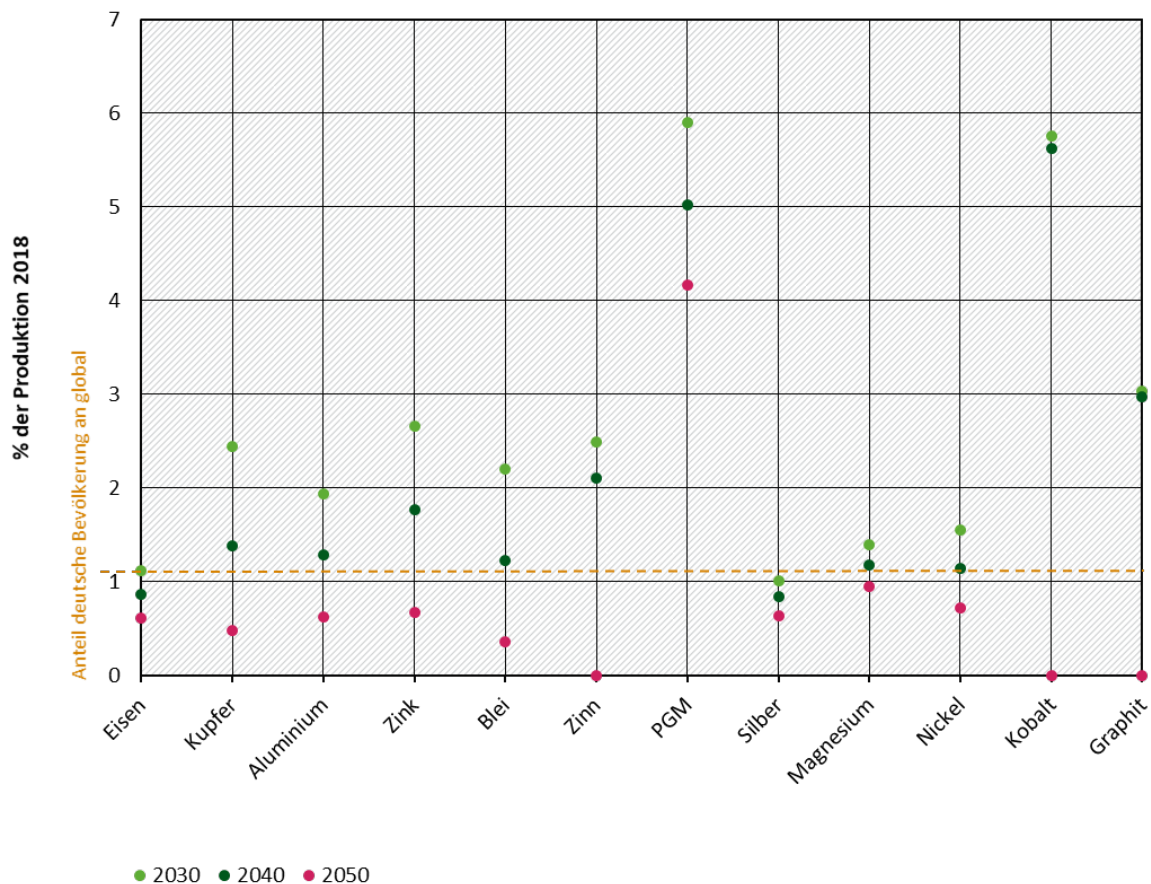
Abbildung 30 zeigt den Vergleich der von Deutschland im Zuge der Transformation in GreenMe ermittelten nachgefragten Mengen als Anteil an der globalen Produktion in 2018. Der Anteil der deutschen Bevölkerung an der globalen Bevölkerung (aktuell) kann als Referenz gelten, der zeigt, inwieweit die Nachfrage aus Deutschland im Vergleich zur globalen Nachfrage ausfallen würde, wenn alle Menschen dieselbe Menge nachfragen würden.

Die von Deutschland nachgefragten Mengen nach Eisen und Silber liegen unter oder etwa im Rahmen der Referenz. Das heißt, die von Deutschland nachgefragte Menge ist, verglichen mit der heutigen Produktion, unterproportional. Unter den Annahmen in GreenMe für Deutschland, Europa und für den Rest der Welt und bei einer etwa gleichen globalen pro-Kopf-Nachfrage ist folglich keine Knappheit bei gleichbleibender Produktion zu erwarten.

Die Nachfrage nach Kupfer, Aluminium, Zink, Blei, Kobalt, Graphit, Nickel und Zinn liegt im Pfad über und in 2050 unter der Referenzlinie. Deutschland fragt im Vergleich zum Anteil an der globalen Bevölkerung überproportional viel nach.

In allen Jahren ist die Nachfrage nach Platingruppenmetallen und Lithium höher als die Referenz. Die deutsche Nachfrage nach Lithium liegt in 2030 – 2040 – 2050 bei 8 – 65 – 59 % der Produktionsmenge von 2018. Bei diesen Metallen zeichnet sich somit unter den Annahmen im GreenMe-Szenario eine Knappheit ab, sofern die Produktionsmengen von Primär- und/oder Sekundärmetallen nicht gesteigert werden und die Nachfrage aus anderen Ländern mit der deutschen Nachfrage vergleichbar ist. Es ist dabei zu beachten, dass die erforderliche Lithiummenge (ebenso wie Graphit, Siliziummetall und Kobalt) ohne Sekundäranteil ermittelt wurden. Die ausgedienten Autobatterien übertreffen bei Weitem den im Energiebereich ermittelten Bedarf an Kurzzeitspeichern. Es stünde somit eine große Menge Altbatterien für den Aufbau eines Lithiumrecyclings zur Verfügung, womit Versorgungsengpässe gemindert werden könnten.

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

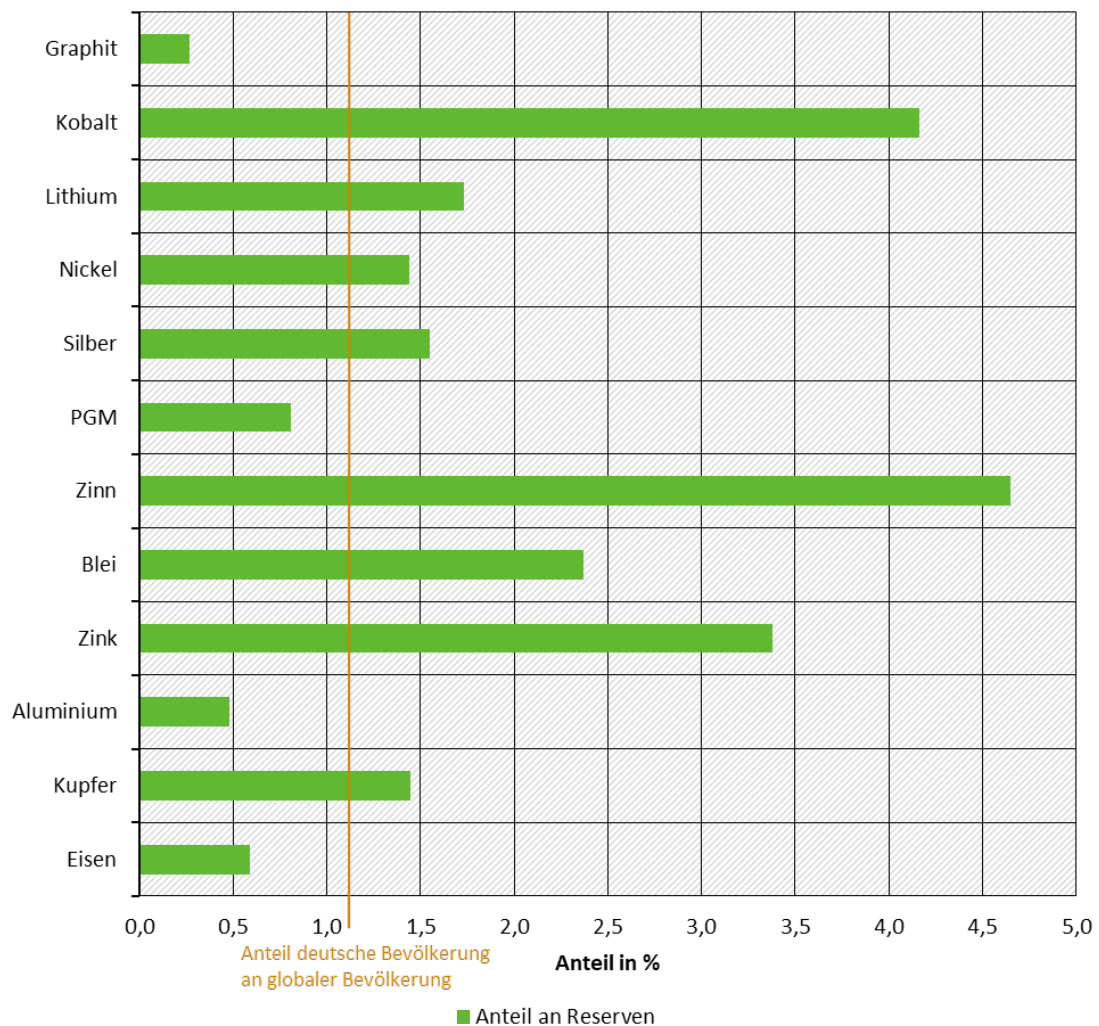


Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG – URMOD und USGS (2020)

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 liegt die kumulierte Nachfrage unter dem gegenwärtigen Anteil der deutschen an der globalen Bevölkerung (Abbildung 31). Die kumulierte Nachfrage nach Kupfer, Nickel, Silber, Zinn, Blei, Zink, Lithium und Kobalt übersteigt jedoch den Anteil der deutschen an der globalen Bevölkerung. Hierbei ist zu beachten, dass im Falle von Lithium und Kobalt keine Nutzung von Sekundärrohstoffen berücksichtigt wurde. Unter den Szenario-Annahmen in GreenMe und insbesondere unter der Berücksichtigung der angenommenen Entwicklungen im Ausland kann eine überproportionale Nachfrage als ein Hinweis auf mögliche Versorgungsengpässe interpretiert werden. Um mögliche Versorgungsengpässe zu mindern, kann die Nachfrage gesenkt werden, beispielsweise, indem andere Technologien oder Substitute einschließlich Sekundärmetalle (Schrotte) genutzt werden, oder es kann das Angebot durch einen Einsatz von besseren Technologien erhöht werden.

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



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

Versorgungsengpässe können gemindert werden, wenn die Nachfrage gesenkt wird, beispielsweise, wenn andere Technologien oder Substitute genutzt werden, oder wenn das Angebot aufgrund des Einsatzes von besseren Technologien erhöht werden kann. Werden die kumulierten Mengen weiterhin mit den Ressourcen, also den Mengen, die in der Erdkruste vorkommen, aber noch nicht wirtschaftlich/technologisch abbaubar sind, mit den kumuliert nachgefragten Mengen in Deutschland verglichen, zeigt sich, dass die kumuliert nachgefragten Mengen der analysierten Rohstoffe nicht über 1 % der (bekannten) Ressourcen liegen.

Die Menge der nachgefragten Schrotte und Sekundärmaterialien ist im GreenMe-Szenario hoch, auch wenn die von Deutschland nachgefragten Mengen konstant oder rückläufig sind. Viele Basismetalle sind in sehr langlebigen Infrastrukturen oder Produkten (Maschinen, Fahrzeugen, u.ä.) gebunden. Die Verfügbarkeit von Schrotten hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Lebensdauer der metallhaltigen Gegenstände und Infrastrukturen ebenso wie Rückbau- und Sammel- und Aufbereitungsquoten.

Im GreenMe-Szenario wurde angenommen, dass im Rest der Welt in 2050 ebenso hohe Sekundäranteile in der Metallproduktion nachgefragt und verarbeitet werden wie in Deutschland. 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 in den nächsten Jahren entsteht (e.g. (OECD 2019; Pauliuk et al. 2013; Schipper et al. 2018). Die Nachfrage betrifft die Sekundärmetalle ebenso wie die oben bereits diskutierten Primärmetalle.

Würden – als Minimalabschätzung – in 2050 alle Menschen nur dieselbe Schrottmenge wie Deutschland nachfragen, so wird in 2050 eine Gesamtmenge von rund 1,9 Mrd. Tonnen Eisenschrotten, 54 Mio. Tonnen Kupferschrotten und 88 Mio. Tonnen Aluminiumschrotten global nachgefragt. Zum Vergleich: 2017 waren nach Schätzung Worldsteel Association 750 Mio. Tonnen Eisenschrott verfügbar, in 2050 wird die verfügbare Menge auf 1,3 Mrd. Tonnen ansteigen (Çiftçi 2018). Für 2017 wurde die Menge global genutzten Kupferschrotts auf etwa 4 Mio. Tonnen geschätzt (International Copper Study Group 2019), eine Schätzung der in 2050 verfügbaren Menge liegt nicht vor. Für 2014 schätzt (The International Aluminium Institute 2018) die verfügbare Menge an Aluminiumschrott auf 26 Mio. Tonnen. Angesichts der in GreenMe 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 (UBA 2019a). 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, 2020). 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 müssen, wird dies mit hohen Umweltbelastungen verbunden sein.

5.3.2.6 Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe2

Die sehr ressourceneffiziente Transformation in GreenMe führt im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 [2030/2040] liegt der RMC 16,4 % [9,0/9,7] niedriger als in GreenEe2 (Tabelle 57). Der Unterschied ist bei den fossilen Rohstoffen und bei den Metallerzen besonders ausgeprägt. Der Konsum von Biomasse ist aufgrund der Substitutionen abiotischer durch biotische Materialien etwas höher als in GreenEe2. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 um 16,4 % niedriger als bei GreenEe2.

Tabelle 57: Der Rohstoffkonsum (RMC) in GreenMe und GreenEe2 im Vergleich

	GreenMe			GreenEe2			GreenMe ggü. GreenEe2 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
RMC gesamt	829.757	629.430	439.524	912.252	697.144	525.710	-9,0	-9,7	-16,4

	GreenMe			GreenEe2			GreenMe ggü. GreenEe2 in %		
Biomasse	211.943	181.994	159.159	210.550	181.618	159.198	0,7	0,2	0,0
Metallerze	127.538	89.259	51.547	137.963	100.696	71.014	-7,6	-11,4	-27,4
Nicht- metallische Minerale	398.009	317.365	228.817	450.523	372.518	288.894	-11,7	-14,8	-20,8
Fossile Rohstoffe	92.267	40.811	0	113.216	42.312	6.604	-18,5	-3,5	-100

Quelle: eigene Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.4 Flächennutzung

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

Auch wenn die Siedlungsneuentwicklung rückläufig ist und infolge dessen die Flächenneuanspruchnahme 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. Insgesamt steigt die Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 53.062 km² an, dies entspricht 14,8 % der gesamten Bodenfläche Deutschlands (Tabelle 58).

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

Die Flächenbelegung durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (Freiflächen-PV und WEA-on-shore) liegt in 2050 bei insgesamt 611 km². Diese Fläche beinhaltet die versiegelten und überschirmten Flächen sowie Zwischenflächen und Flächen für den Kranstellplatz und Zuwegung und ist nicht identisch mit der Flächenangabe zu EE-Potenzialen. Die Flächenbelegung entspricht 0,17 % der Gesamtfläche Deutschlands.

Tabelle 58: Flächennutzung in Deutschland in 2010, 2030, 2040 und 2050

	2010 ¹	2030 ²	2040 ²	2050 ²	Quelle
Bodenfläche TOTAL [km²]	357.127	357.582*	357.582	357.582	Destatis, Fortschreibung 2017
SIEDLUNG und Verkehrsfläche	51.291	52.750	53.064	53.062	Eigene Berechnung

	2010 ¹	2030 ²	2040 ²	2050 ²	Quelle
Wohnbau, Industrie/Gewerbe, Erholung, sonst. Siedlungsflächen	30.901	32.156	32.492	32.596	Eigene Berechnung
Betriebsfläche	2.459	2.047	1.831	1.665	Eigene Berechnung auf der Basis von URMOD
Verkehr	17.931	18.547	18.740	18.801	Eigene Berechnung
VEGETATION (Abgrenzung Destatis) einschl. UNLAND	297.279	296.616	296.303	296.305	
Landwirtschaft	162.080	153.913	151.168	150.556	ALMOD
davon Acker	115.140	112.723	111.515	111.515	ALMOD
davon Grünland	44.440	39.708	37.341	37.341	ALMOD
Flächenstilllegung	2.500	1.482	2.311	1.700	ALMOD
Wald (WEHAM)	107.664	106.190	106.250	106.360	
Sonstige Vegetation	27.535	36.513	38.885	39.389	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)		6.560	10.093	10.093	Annahme LULUCF
Bergbaufolgefläche		561	777	943	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	378	505	611	
Fläche für PV-Freifläche	89	337	451	548	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)
Fläche für WEA – onshore	32	41	54	62	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Das GreenMe-Szenario beschreibt einen ambitionierten Transformationspfad zu einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland, in dem ressourcenschonende Technologien und technisch orientierte Ansätze zu besonders hohen Materialeinsparungen führen und somit einen weiteren Beitrag zur Treibhausgasminderung erbringen. Die sehr ambitionierten technologischen Veränderungen finden im In- und Ausland statt.

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 GreenMe-Szenario werden in 2050 insgesamt 96,4 % weniger **Treibhausgasemissionen** als in 1990 emittiert. Zu diesem Rückgang tragen alle Sektoren bei. Allerdings können ausschließlich energiebedingte THG-Emissionen vollständig vermieden werden. In allen anderen Quellgruppen verbleiben Treibhausgasemissionen, die nach dem heutigen Wissensstand nicht vermeidbar sind. Relevante Quellgruppen sind weiterhin die Bodenbewirtschaftung und die Tierhaltung in der Landwirtschaft sowie die Zementindustrie - trotz erheblicher Einsparungen durch die Einführung neuer Technologien und trotz der Reduktion der Nachfrage.

Die **Landwirtschaft** ist von den Veränderungen der internationalen Handelsannahmen direkt betroffen. Zusätzlich zu technischen und konsumbezogenen Änderungen, die in allen GreenEe-Szenarien angenommen werden, wird in GreenMe (wie auch in GreenLife und GreenSupreme) ein Selbstversorgungsgrad von 150 % angenommen, in Folge sinken nicht nur viele Viehbestände, sondern auch die Treibhausgasemissionen auf nur noch 26,5 Mio. Tonnen CO_{2Äq} in 2050.

Die Annahmen im GreenMe-Szenario bezüglich der **Landnutzung und Landnutzungsänderungen** entsprechend denen der GreenEe-Szenarien. So verläuft die Wiedervernässung von Mooren linear und ist 2040 abgeschlossen, der Torfabbau ist ab 2040 gestoppt. Dies und weitere Annahmen wie Grünlandumbruch und die rückläufige Flächenneuanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr führen zu sinkenden Treibhausgasemissionen, die in 2050 nur noch bei 6,5 Mio. Tonnen CO_{2Äq} liegen.

Die technologischen Änderungen in der Produktion, die höhere Langlebigkeit der Güter, ambitionierte Leichtbauweisen und Substitutionen führen zu rückläufigen Produktionsmengen vieler Basisindustrien, darunter die Stahl-, Gießerei- und Zementindustrie. Die prozessbedingten Treibhausgasemissionen in der Industrie sinken auf insgesamt 10,4 Mio. Tonnen CO_{2Äq}.

In 2050 werden insgesamt 4,6 % weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1 und 2,8 % weniger als in GreenEe2. Der relevanteste Unterschied von 6,4 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 geht auf die Verringerung der Handelsüberschüsse zurück, die in GreenEe1 durch die vorgegebenen Produktionsmengen (trotz sinkender Inlandsnachfrage) entstehen. Die im Vergleich zu GreenEe2 höhere Materialeffizienz führt zu einem weiteren Rückgang von 1,3 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 (1,7 Mio. t CO_{2Äq} in 2030 / 2,3 Mio. t CO_{2Äq} in 2040). Allerdings sind auch in den anderen Green-Szenarien ambitionierte Materialeffizienzannahmen enthalten, die zu erheblichen Treibhausgasminderungen führen und im GreenMe-Szenario nicht weiter gesteigert werden konnten. Zu nennen sind insbesondere die Umstellung der Energieversorgung von fossilen Rohstoffen auf erneuerbaren Energiequellen. Ferner die Technologieumstellungen in der Metallindustrie, ohne die das Erreichen von Treibhausgasneutralität ohne die Nutzung von CCS nicht möglich wäre.

Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in GreenMe um 0,534 Mrd. Tonnen (1,2 %) niedriger als beispielsweise in GreenEe1.

Die **Gebäudewärmeversorgung** weist nur geringe Unterschiede auf. Grundsätzlich wurde auch das gleiche Gebäudewärmenachfrageszenario wie in den GreenEe-Szenarien unterstellt, und damit eine sehr hohe Effizienz ohne jedoch einen grundsätzlichen Verhaltenswandel zu berücksichtigen. In der Gebäudeversorgung wird wie in den GreenEe-Szenarien der Bereich der Fernwärme auf 20 % ausgebaut, mit einem hohen Anteil von Großwärmepumpen. Dezentrale Wärmepumpen machen langfristig 80 % der Wärmeversorgung aus. Dabei wird das Potenzial der Erdsonden weitestgehend ausgeschöpft, so dass in Summe ein sehr effizientes System erreicht wird. In der **Industrieprozesswärme** wird aufgrund der höheren Materialeffizienz in GreenMe eine deutliche Verbrauchsreduktion in 2050 um 36 TWh auf 90 % gegenüber GreenEe2 erreicht. Die Versorgung dieser Wärmenachfrage ist aber vergleichbar mit GreenEe - mit Großwärmepumpen im Bereich Warmwasser bis 100°C, mit Elektrodenkesseln und KWK-Anlagen im Bereich Dampf 100-500°C und verfahrensabhängig mit Strom, Methan oder Wasserstoff im Bereich der Öfen.

Im **Verkehrssektor** wird deutlich, dass in GreenMe der nationale Verkehr bereits im Jahr 2030 2 % weniger Endenergie benötigt als GreenEe2, und bis 2050 diese zusätzliche Endenergieeinsparung auf 6 % steigt. Dabei sind die zusätzlichen Einsparungen im Jahr 2050 im Güterverkehr mit 9 % höher als im Personenverkehr mit 4 %. Auch im internationalen Verkehr führen die zusätzlich angenommenen technischen Verbesserungen, speziell in der Seeschifffahrt zu zusätzlichen Endenergieeinsparungen um 1 % (2030) bis 3 % (2050). Während im Personenverkehr nur Effizienz-verbesserungen in den Antriebskonzepten unterstellt wurden, konnte im Güterverkehr in GreenMe zusätzlich zur Effizienz durch angenommene langfristige Vollelektrifizierung von Oberleitungs-Lkw höhere Einsparungen erreicht werden. Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenMe etwa 2 % weniger Kraftstoff und ebenso 2 % weniger Strom benötigt als in GreenEe2. Im Jahr 2050 werden in GreenMe 1 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 12 % (national) bzw. 8 % (Summe national + international) niedriger als in GreenEe2.

Die wesentlichen Unterschiede im **Energiebereich** liegen in drei Punkten:

- ▶ Einsatz von Gas in der Stromerzeugung in 2030
- ▶ Veränderung des Verhältnisses Wind-Onshore zu PV im Pfad
- ▶ Rückwirkungen aufgrund der Effizienzsteigerungen insbesondere in der Industrie und im Güterverkehr.

Aus dem Vergleich mit den GreenEe-Szenarien wird deutlich, dass es langfristig 2050 insbesondere weniger PV (-30 GW gegenüber GreenEe1 bzw. -25 GW gegenüber GreenEe2) braucht, um eine geringere nationale direkte Stromnachfrage decken zu können. Die installierten Windleistungen liegen im gleichen Bereich. Gas nimmt aufgrund des Fuel-Switchs bereits 2030 eine stärkere Rolle als Brückentechnologie in der Stromerzeugung (+ 20 bzw. + 23 TWh) ein, während der Anteil von Kohlestrom geringer ist (-13,8 bzw. -20 TWh). Durch beide Maßnahmen können in Summe Rohstoffe gespart werden.

Beim summarischen Endenergieverbrauch von GreenMe im Vergleich zu GreenEe1 und GreenEe2 ist die moderate Einsparung von langfristig 7 % ungefähr zu Hälfte auf die Handelsbilanz und zur Hälfte auf die Effizienz zurück zu führen. Aus dem Vergleich des Stromverbrauchs zeigt sich, dass der geringere Stromverbrauch von -38 TWh bzw. 33 TWh vor allen auf weniger PtG und PtH zurück zu führen ist. Der herkömmliche Stromverbrauch ist

dagegen langfristig zwar um 25 TWh geringer als in GreenEe1 aber nur um 5 TWh als GreenEe2. Es wird weniger PtG als in GreenEe1 aber mehr als in GreenEe2 national erzeugt. Aus dem Vergleich mit GreenEe1 und GreenEe2 wird deutlich, dass eine geringere nationale Stromerzeugung notwendig wird, die viel weniger von der Änderung des internationalen Handels als von der Effizienz bestimmt wird. Im Vergleich zu GreenEe1 ist der langfristige Brennstoffbedarf zwar etwas geringer (-16 TWh in 2050), aber bei gleichen Annahmen zum internationalen Handel (GreenEe2) zeigen sich langfristig nur Unterschiede beim Verhältnis zwischen PtG-Importen zu nationaler PtG-Erzeugung. Bei GreenMe ist der Anteil der Importe mit 83,3 % etwas höher als in GreenEe2 mit 81 %.

Die Transformation einschließlich der Materialeffizienzansätze, die in GreenMe angenommen wurden, führen zu einer Reduktion des **Primärrohstoffkonsums** (RMC) um 68 % gegenüber 2010 auf insgesamt 439,5 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente. Dabei tragen die Umstellung auf erneuerbare Energieträger und die Technologien zur höheren Schrottverwertung in der Metallindustrie erheblich zur Reduktion der nachgefragten Primärrohstoffe bei. Die Rückgänge des Konsums der nicht-metallischen Mineralien sind mengenmäßig ebenso hervorzuheben. Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 270 Mio. Tonnen Primärrohstoffe eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 38 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 führt die sehr ressourceneffiziente Transformation in GreenMe zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 16,4 % niedriger als in GreenEe2. Der Unterschied ist in 2050 bei den fossilen Rohstoffen und bei den Metallerzen besonders ausgeprägt. Ein wichtiger Unterschied zwischen GreenEe1, GreenEe2, GreenLate bzw. GreenLife auf der einen Seite und auf der anderen Seite GreenMe und GreenSupreme besteht in den Annahmen zur Entwicklung im Rest der Welt. Da Deutschland eng in den internationalen Handel eingebunden ist und dies annahmegemäß auch weiterhin bleibt, haben die angenommenen technologischen Änderungen im Rest der Welt einen starken Einfluss auf den Rohstoffkonsum in Deutschland.

Der Konsum von Biomasse ist aufgrund der Substitutionen abiotischer durch biotische Materialien insgesamt höher als in GreenLife und GreenSupreme. In GreenMe überlagern sich verschiedene Effekte: so sinkt die inländische Nachfrage nach Holz, weil Primärholz (wie auch in anderen Green-Szenarien) nicht mehr energetisch genutzt wird und die Nachfrage sinkt, weil verschiedene Sektoren wie die Papier- oder Verpackungsindustrie aufgrund der hohen Materialproduktivität weniger Holzprodukte nachfragen. Andererseits steigt die Nachfrage aus dem Bausektor (Hoch- und Tiefbau) in GreenMe besonders stark, wodurch abiotische Rohstoffe substituiert werden. Ein wichtiger Effekt ist die Bindung von CO₂ in der Technosphäre über mehrere Dekaden, was eine zusätzliche Senke darstellt, die im Projekt jedoch nicht quantifiziert wurde.

In Folge des niedrigeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person mit 6,1 Tonnen in 2050 um 16,4 % niedriger als in GreenEe2. Dies ist eine Reduktion um 68 % gegenüber 2010 und etwa die Hälfte des gegenwärtigen globalen Durchschnittskonsums. Der Konsum von Lebensmitteln stellt dabei den größten Anteil des Konsums in 2050, während die Rohstoffaufwendungen für Mobilität, Wohnen und Freizeit signifikant sinken. Trotz Reduktion der absoluten Rohstoffmengen bleiben die Rohstoffaufwendungen für die Unterhaltung und Erneuerung der bestehenden Gebäude- und Infrastrukturen weiterhin hoch.

Die zwischen 2010 und 2050 kumulierte Nachfrage nach Primärrohstoffen ist in GreenMe 6,3 % niedriger als in GreenEe1. Die Nachfrage nach Rohstoffen liegt in GreenMe für fast alle untersuchten Metalle niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Die Ausnahme ist Aluminium, das

als Substitut für Eisen und Kupfer insbesondere in 2030 stark nachgefragt ist. Besonders ausgeprägt ist die geringere Nachfrage bei Siliziummetall, das aufgrund der materialsparenden und langlebigeren Technologien in GreenMe in einem geringeren Umfang (-80 % bis -82 % im Vergleich zu GreenEe1 in allen untersuchten Jahren) erforderlich ist. Dies zeigt, dass die Auswahl von ressourcenschonenden Technologien einen wichtigen Beitrag zur Senkung der Rohstoffnachfrage erbringen kann.

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

- ▶ Die Substitution der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Energien bzw. synthetische Rohstoffe
- ▶ Die hohe Substitution von Primärrohstoffen durch biotische Rohstoffe, durch leichtere Rohstoffe und/ oder durch Sekundärrohstoffe
- ▶ Die hohe Steigerung der Materialeffizienz in Industrien und Dienstleistungen
- ▶ Die verlängerten Lebensdauern und materialeffizienten Technologien
- ▶ Die Reduktion der Nachfrage nach einer Vielzahl von Gütern und Dienstleistungen, ausgehend von einer geänderten Konsumentennachfrage; rohstofflich relevant ist insbesondere der Rückgang der Wohnraumnachfrage und in Verbindung damit die rückläufige neue (zu erschließende) Siedlungsfläche.

Ambitionierte rohstoffschonende technologische Änderungen können somit, neben notwendigen Änderungen der Konsumnachfrage, einen wichtigen Beitrag zur zusätzlichen Minderung von Treibhausgasemissionen und Primärrohstoffnachfrage leisten.

7 Quellenverzeichnis

BINE Informationsdienst (2011): Photovoltaik – Innovationen. Neue Konzepte und Produktionstechniken für Solarzellen und Module. FIZ Karlsruhe (Hrsg.).

BINE Informationsdienst (2018): Solarzelle nutzt Vorder- und Rückseite. Photovoltaik – innovative Zelltypen. Energieforschung für die Praxis. FIZ Karlsruhe (Hrsg.).

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

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

BMUB (2016b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/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. <https://www.buergerdialog-stromnetz.de/assets/Downloads/Factsheet-Erdkabel-und-Freileitung-herunterladen.pdf> (28.07.2020).

Caduff, M.; Huijbregts, M. A. J.; Althaus, H. J.; Koehler, A.; Hellweg, S. (2012): Wind power electricity: The bigger the turbine, the greener the electricity? In: Environmental Science and Technology. Vol. 46, No.9, S. 4725–4733.

Çiftçi, B. B. (2018): Blog: The future of global scrap availability. In: worldsteel Association.

<https://www.worldsteel.org/media-centre/blog/2018/future-of-global-scrap-availability.html>. (28.07.2020).

Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Kämper, C.; Auberger, A.; Priestr, M.; Rechlin, A.; Schöning, N.; Rüttinger, L.; Becker, F.; Scholl, C. (2020): Weiterentwicklung von Handlungsempfehlungen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II. UBA Texte 79/2020 Vorhaben des Umweltbundesamtes, FKZ 3715 32 310 0, Dessau-Roßlau.

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 (ÖkoRess 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 (2018): Umweltökonomische Gesamtrechnungen Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. 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 Textilbeton (2018): „Erste Zulassung erteilt“.
<http://www.textilbetonzentrum.de/aktuelles/>.

- 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 - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020.
- Fronde, 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.
- ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH (2013): Forschungsbericht Flächengewicht Mehrscheiben-Isolierglas. ift Rosenheim.
- IMO (2014): Third IMO GHG Study. In: International Maritime Organization.
- International Copper Study Group (2019): THE WORLD COPPER FACTBOOK 2019.
- 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.
- Klimm, M. (2018): Telefonisches Gespräch mit Frau Magdalena Klimm (Mitarbeiterin am Institut für Textiltechnik, ITA, der RWTH Aachen) am 25.07.2018.
- OECD (2019): Global Material Resources Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris.
- 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.; Stümer, W.; Dunger, K. (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. In: AFZ-DerWald. No.13/2017.
- Sack, N.; Rose, A. (2013): Energieeffizientes Mehrscheiben-Isolierglas Untersuchungen von technischen Maßnahmen zur Reduzierung des Flächengewichtes. Fraunhofer IRB Verlag.
- Schipper, B. W.; Lin, H. C.; Meloni, M. A.; Wansleben, 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.
- Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S. (2011): Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Meilensteinbericht des Arbeitspaketes 2.3 des Projekts "Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRes). Wuppertal.
- The International Aluminium Institute (2018): Global Metal Flow. <http://recycling.world-aluminium.org/review/global-metal-flow/>.
- Treyer, K. (2010a): Wind power plant construction, 2MW, offshore, moving parts, GLO, Ecoinvent database 3.3.
- Treyer, K. (2010b): Wind power plant construction, 2MW, offshore, moving parts, GLO, Ecoinvent database 3.3.
- Treyer, K. (2014): Wind turbine construction, 2.3MW, precast concrete tower, onshore, Ecoinvent database 3.4.
- 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_d_t.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.

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

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf (28.07.2020).

UBA (2019b): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid-> (28.07.2020).

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

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. Schandl, Heinz Fischer-Kowalski, Marina West, James Giljum, Stefan Dittrich, Monika Eisenmenger, Nina Geschke, Arne Lieber, Mirko Wieland, Hanspeter Schaffartzik, Anke Krausmann, Fridolin Gierlinger, Sylvia Hosking, Karin Lenzen, Manfred Tanikawa, Hiroki , Paris.

USGS (2020): Mineral Commodity Summaries 2020.

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

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.