

CLIMATE CHANGE

06/2020

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Vergleich der Szenarien

Abschlussbericht

CLIMATE CHANGE 06/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 41 115 0
FB000439/6

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Vergleich der Szenarien

Abschlussbericht

von

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

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH,
Heidelberg

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

IEE – Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik, Kassel

Dr. Karl Schoer
SSG, Wiesbaden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

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

🌐/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

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

Abschlussdatum:

September 2020

Redaktion:

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

Fachgebiet I 1.1. "Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien, Ressourcenschonung"
Jens Günther

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

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

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes

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

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

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Biemann, K., von Oehsen, A.; Mellwig, P., Neumann, K., Gerhardt, N., Schoer, 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_treibhausgasneutralitaet_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 – Vergleich der Szenarien

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.

Dieser Bericht ist eine Synthese und ein Vergleich der zentralen Ergebnisse zu den Treibhausgasemissionen und der Rohstoffinanspruchnahmen der sechs Green-Szenarien. Die größten Unterschiede finden sich über nahezu alle Vergleichsparameter zwischen dem am wenigsten ambitionierten Transformationspfad in GreenLate auf der einen Seite und dem ambitioniertesten Transformationspfad in Green-Supreme auf der anderen Seite. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede zwischen den (im Vergleich zu GreenEe1) zusätzlichen Ressourceneffizienzanstrengungen in GreenMe und den zusätzlichen Lebensstiländerungen in GreenLife gering, wenn auch im Detail vorhanden.

Eine sehr ambitionierte Transformation, wie sie GreenSupreme zeigt, spart im Vergleich zu einer weniger ambitionierten Transformation wie im GreenLate-Szenario insgesamt 4,8 Mrd. Tonnen CO₂Aq bis 2050 und 5,7 Mrd. Tonnen Primärrohstoffe.

Abstract: Transformation to a greenhouse gas neutral and resource efficient Germany – Comparison of the scenarios

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.

This report is a synthesis and comparison of the key findings on greenhouse gas emissions and raw material use of the six Green-scenarios. The greatest differences can be found between the least ambitious transformation path in GreenLate on the one hand and the most ambitious transformation path in Green-Supreme on the other. In comparison, the differences between the additional resource efficiency efforts in GreenMe (compared to GreenEe1) and the additional lifestyle changes in GreenLife are small, although present in detail.

A very ambitious transformation, as in GreenSupreme, can save an additional 4.8 billion tonnes of CO₂eq by 2050 and 5.7 billion tonnes of primary raw materials compared to a less ambitious transformation, as in GreenLife.

Inhaltsverzeichnis

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	11
Zusammenfassung.....	14
Summary	18
1 Einführung.....	22
1.1 Herausforderung Klimawandel und die Green-Szenarien	22
1.2 Übersicht über die Szenarien.....	23
1.3 Zielsetzung dieses Berichts	24
1.4 Aufbau des Berichts	25
2 Treibhausgasemissionen	26
2.1 Treibhausgase nach Quellgruppen	26
2.2 Energiebedingte Treibhausgase.....	29
2.3 Industrieprozesse.....	33
2.4 Abfall und Abwasser	36
2.5 Landwirtschaft	38
2.6 LULUCF (ohne Wald).....	40
2.7 Treibhausgase aus der Konsumperspektive	41
2.8 Kumulierte Emissionen	42
3 Rohstoffe	44
3.1 Der Primärrohstoffkonsum im Vergleich	44
3.2 Der Rohmaterialinput (RMI) im Vergleich	46
3.3 Gesamtrohstoffproduktivität im Vergleich.....	50
3.4 RMC pro Kopf im Vergleich.....	51
3.5 Sekundärrohstoffe im Vergleich	52
3.6 Investitionen und die Nachfrage von privaten Haushalten, Staat und NRO im Vergleich ...	55
3.7 Bedürfnisfelder im Vergleich	56
3.8 Kumulierte Rohstoffe im Vergleich.....	58
3.9 Die Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich.....	58
3.9.1 Holz	58
3.9.2 Sand, Kies und Schotter	59
3.9.3 Eisen.....	59

3.9.4	Kupfer.....	60
3.9.5	Aluminium.....	61
3.9.6	Ausgewählte Technologiemetalle.....	62
3.10	Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion	64
4	Zusammenfassung.....	67
A	Quellenverzeichnis	70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	THG-Emissionen in 2030 gegenüber 1990 und 2010 im Szenario-Vergleich (ohne LULUCF und internationale Verkehre)	26
Abbildung 2:	THG-Emissionen in 2030 nach Quellgruppen im Szenario-Vergleich	28
Abbildung 3:	THG-Emissionen in 2050 nach Quellgruppen im Szenario-Vergleich	29
Abbildung 4:	THG-Emissionen Energie	30
Abbildung 5:	THG-Emissionen Industrieprozesse	34
Abbildung 6:	THG-Emissionen aus Deponien, MBA/MBS und Kompostierung/Vergärung	37
Abbildung 7:	THG-Emissionen abflussloser Gruben und Kläranlagen	38
Abbildung 8:	THG-Emissionen Landwirtschaft in 2030, 2040 und 2050	39
Abbildung 9:	Kumulierte Treibhausgase in den Gütern der letzten Verwendung (Konsumperspektive)	42
Abbildung 10:	Treibhausgasemissionen, kumuliert 1990 bis 2030, 2040 und 2050	43
Abbildung 11:	Treibhausgasemissionen kumuliert 2018 bis 2030, 2040 und 2050	43
Abbildung 12:	Primärrohstoffkonsum 2030 gegenüber 2010 im Szenario-Vergleich	44
Abbildung 13:	Primärrohstoffkonsum in 2050 gegenüber 2010 im Szenario-Vergleich	45
Abbildung 14:	Primärrohstoffkonsum GreenLate und GreenSupreme im Vergleich, 2030, 2040 und 2050	46
Abbildung 15:	Rohmaterialinput (RMI) GreenLate und GreenSupreme im Vergleich in 2030, 2040 und 2050	49
Abbildung 16:	RMC, RMI und Gesamtrohstoffproduktivität GreenLate und GreenSupreme im Vergleich, 1994 bis 2050	51
Abbildung 17:	Primärrohstoffkonsum pro Person nach Rohstoffgruppen in 2030, 2040 und 2050	52
Abbildung 18:	Primär- und Sekundärrohstoffe 2030 gegenüber 2010 im Szenarien-Vergleich	53
Abbildung 19:	Primär- und Sekundärrohstoffkonsum in 2050 gegenüber 2010 im Szenario-Vergleich	54
Abbildung 20:	Primär- und Sekundärrohstoffkonsum GreenLate und GreenSupreme im Vergleich	55
Abbildung 21:	Primärrohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung in 2050	56
Abbildung 22:	Primärrohstoffkonsum nach Bedürfnisfelder und Rohstoffgruppen in 2050	57

Abbildung 23:	Zwischen 2010 und 2030 bzw. 2050 kumulierter Primärrohstoffkonsum	58
Abbildung 24:	Nachfrage (LIV) nach Primäreisen und Eisenschrotten in 2030, 2040 und 2050.....	60
Abbildung 25:	Nachfrage (LIV) nach Primärkupfer und Kupferschrotten in 2030, 2040 und 2050.....	61
Abbildung 26:	Nachfrage nach Aluminium, primär und sekundär, in 2030, 2040 und 2050.....	62
Abbildung 27:	Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen (LIV) im Vergleich zur Produktionsmenge 2018	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich.....	23
Tabelle 2:	Treibhausgasminderung im Zielpunkt (2050) der Green-Szenarien mit Berücksichtigung von LULUCF und internationalen Verkehren	27
Tabelle 3:	THG-Emissionen Energie 2030, ohne Verkehr	30
Tabelle 4:	THG-Emissionen Energie ohne Verkehr, 2040	31
Tabelle 5:	THG-Emissionen Verkehr.....	32
Tabelle 6:	THG-Emissionen Industrieprozesse	34
Tabelle 7:	THG-Emissionen nach Bereichen in der Landwirtschaft gegenüber 1990.....	39
Tabelle 8:	THG-Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen (ohne Wald).....	41
Tabelle 9:	Rohmaterialinput 2010 und 2030 in allen Green-Szenarien in Mio. Tonnen RME	47
Tabelle 10:	Rohmaterialinput in 2010 und 2040 in allen Green-Szenarien in Mio. Tonnen RME	47
Tabelle 11:	Rohmaterialinput in 2010 und 2050 aller Green-Szenarien in Mio. Tonnen RME	48
Tabelle 12:	Gesamtrohstoffproduktivität, historisch und in den Szenariojahren, jahresdurchschnittliche Veränderung in %	50
Tabelle 13:	Nachfrage nach Primärholz in 2030, 2040 und 2050	59
Tabelle 14:	Nachfrage nach Sand, Kies und Schotter in 2030, 2040 und 2050	59
Tabelle 15:	Nachfrage (LIV) nach ausgewählten Metallen (1) in Tsd. Tonnen.....	62
Tabelle 16:	Nachfrage (LIV) nach ausgewählten Metallen (2) in Tonnen	63
Tabelle 17:	Nachfrage nach ausgewählten Metallen (3) in Schlüsseltechnologien in Tonnen	64

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CO₂	Kohlendioxid
CO₂Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
CH₄	Methan
C_{syn}	synthetisch erzeugter Kohlenstoff
DE	Domestic Extraction – heimische Rohstoffentnahme
Destatis	Statistisches Bundesamt
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
KSP	Klimaschutzplan
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
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PGM	Platingruppenmetalle
Ppm	Pars per million – Anteile pro Million
Pkm	Personenkilometer
PtG	Power-to-Gas - auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige

Abkürzung	Beschreibung
	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
SCOPE	Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems
THG	Treibhausgase
THGND	Treibhausgasneutrales Deutschland (UBA-Publikation von 2014)
TREMOD	Transport-Emissions-Modell
UBA	Umweltbundesamt
URMOD	Umweltökonomisches Treibhausgas- und Rohstoffmodell
WEA	Windenergieanlagen

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziel

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 Tabelle 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.

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
Klimaschutzbestreben im Pfad	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch

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

Dieser Bericht zieht einen Vergleich der zentralen Ergebnisse, der Treibhausgasemissionen und der Rohstoffansprachen. Dabei wird insbesondere der Unterschied zwischen

- ▶ der ambitioniertesten Transformation GreenSupreme und der am wenigsten ambitioniertesten Transformation GreenLate
- ▶ den Effekten eines sehr ambitionierten rohstoffeffizienten und sehr ambitionierten Lebensstiländerungen in den Szenarien GreenMe und GreenLife

untersucht.

Ergebnisse

Die größten Unterschiede finden sich über nahezu alle Vergleichsparameter zwischen dem am wenigsten ambitionierten Transformationspfad in GreenLate auf der einen Seite und dem ambitioniertesten Transformationspfad in GreenSupreme auf der anderen Seite. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede zwischen den (im Vergleich zu GreenEe1 & 2) zusätzlichen Ressourceneffizienzanstrengungen in GreenMe und den zusätzlichen Lebensstiländerungen in GreenLife gering, wenn auch im Detail vorhanden.

Die jährlichen Treibhausgasemissionen unterscheiden sich im Jahr 2030 stark im Szenariovergleich. So werden in GreenLate noch immer 586 Mio. Tonnen CO_{2Äq} emittiert – was einem Rückgang von 61,3 % gegenüber 1990 entspricht. Im Gegensatz dazu liegen die THG-Emissionen in GreenSupreme nur noch bei 388 Mio. Tonnen CO_{2Äq}, ein Rückgang von rund 70 %. Die wesentlichen Unterschiede gehen auf die energiebedingten THG-Emissionen einschl. der Emissionen aus dem Transportsektor zurück. Der zügige Ausstieg aus der Kohleverstromung, der flotte Ausbau der erneuerbaren Energien und die schnelle Einführung von Elektromobilität, in GreenSupreme führen im Vergleich zu verzögerten Umstellungen in GreenLate zu insgesamt 172 Mio. Tonnen CO_{2Äq} energiebedingten THG-Emissionen. In 2050 sind die Unterschiede zwischen den Szenarien geringer, aber vorhanden. So liegt die Differenz zwischen GreenLate und GreenSupreme noch immer bei 20,6 Mio. Tonnen CO_{2Äq}.

Die Unterschiede zwischen GreenMe, dem Szenario mit einem sehr ambitionierten technologisch-ressourceneffizienten Wandel, und GreenLife, dem Szenario mit sehr ambitionierten Umstellungen im Lebensstil, zeigen sich vor allem bei den Prozessemissionen aus der Industrie und den THG-Emissionen der Landwirtschaft. Mit sehr ambitionierten ressourceneffizienten Ansätzen können insbesondere prozessbedingte THG-Emissionen aus der Industrie gemindert werden, indem z.B. emissionsintensive Vorprodukte (wie z.B. Zement) gezielt substituiert (z.B. über Holzbaustoffe) oder die Nachfrage (z.B. über neue Betone) insgesamt verringert wird. Die angenommenen zusätzlichen Lebensstiländerungen in GreenLife zeigen den größten Effekt auf die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft, besonders wirksam sind die Annahmen zur weiteren Reduktion von Fleisch und Milch bzw. Milchprodukten.

Werden die Treibhausgasemissionen aus der Konsumsicht bilanziert, das heißt, werden Treibhausgasemissionen der Im- und Exporte verrechnet, zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Bilanzierung der territorialen THG-Emissionen. Bei dieser Bilanzierung sind die Annahmen zur Transformationsgeschwindigkeit im Rest der Welt relevant. So verbleiben in den GreenEe-Szenarien, GreenLate und GreenLife energiebedingte THG-Emissionen auch in 2050, die im Ausland entstehen für die Produktion von Gütern, die im Inland konsumiert werden. Diese entfallen vollständig in GreenMe und GreenSupreme, wodurch die THG-Emissionen in 2050 in beiden Szenarien niedriger liegen. Die Differenz zwischen dem am wenigsten ambitionierten Transformationspfad GreenLate und dem ambitioniertesten Transformationspfad ist erheblich und beträgt in 2030 – 2040 – 2050 beträgt 173,1 – 203,5 – 29,2 Mio. Tonnen CO_{2Äq}. Da in keinem der Green-Szenarien eine Verlagerung von treibhausgasintensiven Industrien angenommen

wurde, ist der Unterschied zwischen den Szenarien aus der konsumperspektive in einer ähnlichen Größenordnung wie der Unterschied bei der Bilanzierung nach NIR.

Auch die Inanspruchnahme von Primär- und Sekundärrohstoffen (in der Abgrenzung des RMC bzw. der LIV) geht in allen Green-Szenarien zurück. Die Rückgänge sind natürlich geringer als bei den THG-Emissionen. Auch bei den Rohstoffen zeigt sich, dass die geringsten Rückgänge bei fast allen untersuchten Parametern bei GreenLate zu finden sind und die höchsten Rückgänge bei GreenSupreme. Im Gegensatz zu den THG-Emissionen gibt es bei der Rohstoffinanspruchnahme einen klareren Unterschied zwischen GreenMe und GreenLife.

Bis 2050 kann die Primärrohstoffinanspruchnahme um 70 % im ambitioniertesten Szenario GreenSupreme gesenkt werden, hingegen nur um 56 % in GreenLate. Die Unterschiede sind vor allem bei der Nachfrage nach abiotischen Rohstoffen (Metalle, nicht-metallische Minerale, fossile Energieträger) zu finden. Dies geht auf unterschiedliche Recyclinganstrengungen, unterschiedliche Ressourceneffizienzsteigerungen und rohstoffsparende Technologien, unterschiedliche Transformationsgeschwindigkeiten im In- und Ausland und natürlich auf die unterschiedliche gesamtwirtschaftliche Nachfrage zurück.

Der Anstieg der Gesamtrohstoffproduktivität ist in GreenMe am höchsten. In GreenSupreme sinkt zwar der RMI stärker als in GreenMe, allerdings wächst aufgrund der Annahme zur Wachstumsbefreiung das BIP nach 2030 nicht weiter, was insgesamt zu einem etwas niedrigeren Anstieg der Gesamtrohstoffproduktivität in allen Dekaden führt. In allen Szenarien wächst die Gesamtrohstoffproduktivität stärker als zwischen 2000 und 2010.

In GreenMe ist auch der Anteil der Sekundärrohstoffe an der Gesamtrohstoffnachfrage (primär und sekundär) am höchsten. Der Anteil der untersuchten Sekundärrohstoffe an der Gesamtrohstoffnachfrage liegt in 2050 bei 38 %. Dieser Wert enthält keine Schrotte von Technologiemetallen und stellt somit eine untere Abschätzung dar. Im Gegensatz zu GreenMe liegt der Anteil in GreenLate bei 27 %.

Wird der RMC in 2050 nach Investitionen, privaten Haushalten, Staat und Nicht-Regierungsorganisationen verglichen, so zeigen sich besonders hohe Unterschiede bei den Rohstoffaufwendungen für die Investitionen. Diese sind in GreenSupreme, gefolgt von GreenMe, am niedrigsten und in GreenLate am höchsten. Auffallend sind die höheren Anteile von biotischen Baustoffen in GreenMe und GreenSupreme und die geringeren Anteile von Metallen und nicht-metallischen Mineralen. Der Unterschied der Rohstoffinanspruchnahme der privaten Haushalte ist im Vergleich der Szenarien sichtbar, wenn auch geringer als bei den Investitionen. Die Rohstoffnachfrage des Staates und von NRO ist vergleichsweise gering, so dass sich die Unterschiede zwischen den Green-Szenarien nicht so stark auswirken.

Die Primärrohstoffnachfrage nach Bedürfnisfeldern zeigt im Szenario-Vergleich in allen Bedürfnisfeldern Unterschiede. Besonders groß sind sie im Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt. Der Neubau von Gebäuden wird bei den Investitionen bilanziert, bei den privaten Haushalten werden jedoch Sanierungen und Reparaturen gerechnet. Daher wirken sich die Annahmen zum Bau in diesem Bedürfnisfeld ebenso aus. Auch in den anderen Bedürfnisfeldern zeigen sich Unterschiede. Größere Unterschiede zeigen sich im Bedürfnisfeld Ernährung. Die Rohstoffinanspruchnahme ist überraschenderweise im Szenario GreenSupreme am höchsten; dies wird verständlich, wenn gleichzeitig das Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus mit betrachtet wird, dem Restaurantbesuche zugeordnet sind. Aufgrund der Wachstumsbefreiung wird in GreenSupreme im Vergleich zu anderen Szenarien weniger Einkommen für Auswärtsessen ausgegeben und dafür mehr zu Hause gegessen.

In allen Green-Szenarien sinkt die Nachfrage nach der Mehrzahl der untersuchten Rohstoffe. Wesentliche Ausnahmen sind Technologiemetalle, die für den Aufbau von Schlüsseltechnologien für die Energiewende benötigt werden, darunter Siliziummetalle und Lithium.

Insgesamt sinkt die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach den (Primär) Basismetallen Eisen, Kupfer und Aluminium in allen Szenarien, am stärksten in GreenSupreme und am geringsten in GreenLate. Aufgrund der geringen Schrottanteile steigt die Nachfrage nach Eisen-, Kupfer- und Aluminiumschrotten in GreenLate weniger als in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife. In GreenSupreme liegt die Nachfrage nach diesen Schrotten etwa gleichauf mit GreenLate.

Wird die Nachfrage mit den aktuellen Produktionsmengen (von 2018) verglichen, so zeigt sich, dass die Nachfrage aus Deutschland bis 2050 insbesondere in GreenSupreme bei der Mehrzahl der untersuchten Metalle auf oder unter rund einem Prozent der Produktionsmenge sinkt. Dies entspricht etwa dem Anteil der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung. Besonders überproportional ist die Nachfrage nach Lithium. Die Nachfrage übersteigt in 2040 bzw. 2050, wenn Elektrofahrzeuge die gängige Technologie in den Green-Szenarien sind, die gegenwärtige Produktion um das 45 bis 95-fache. Trotz der Einsparungen und neuen Technologien in GreenSupreme ist die Nachfrage allein aus Deutschland rund 45mal höher als die gegenwärtige Produktion. Mögliche Recyclingmengen sind bei der Rechnung nicht berücksichtigt, sie könnten die Nachfrage deutlich senken.

Insgesamt zeigt der Szenarienvergleich, dass eine sehr ambitionierte Transformation, wie sie GreenSupreme darstellt, im Vergleich zu einer weniger ambitionierten Transformation wie im GreenLate-Szenario insgesamt 4,8 Mrd. Tonnen CO₂Äq bis 2050 und 5,7 Mrd. Tonnen Primärrohstoffe einsparen kann.

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 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.

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)

This report compares the key findings regarding greenhouse gas emissions and resource use. The focus is put on the difference between

- ▶ the most ambitious scenario, GreenSupreme, and the least ambitious scenario, GreenLate,
- ▶ the effects of very ambitious increases in resource efficiency in GreenMe and very ambitious lifestyles changes in GreenLife.

Results

The greatest differences can be found between the least ambitious transformation path in GreenLate on the one hand and the most ambitious transformation path in GreenSupreme on the other hand across almost all parameters. In comparison, the differences between additional resource efficiency efforts in GreenMe and additional lifestyle changes in GreenLife (compared to GreenEe1 & 2) are small, although present in detail.

Annual greenhouse gas emissions in 2030 differ widely across the scenarios. In GreenLate, 586 million tonnes of CO_{2eq} are emitted - a decrease of 61.3 % compared to 1990. In contrast, GHG emissions in GreenSupreme amount to only 388 million tonnes CO_{2eq}, a decrease of about 70 %. The main differences are due to energy-related GHG emissions, including emissions from the transport sector. The rapid phase-out of coal-fired power generation, the rapid expansion of renewable energies and the rapid introduction of electromobility in GreenSupreme, compared to later transformations in GreenLate, lead to 172 million tonnes CO_{2eq} less energy-related GHG emissions. In 2050, the differences between the scenarios are smaller with a difference between GreenLate and GreenSupreme of 20.6 million tonnes CO_{2eq}.

The difference between GreenMe, the scenario with a very ambitious change to resource-efficient technologies, and GreenLife, the scenario with very ambitious lifestyle changes, is particularly evident regarding process emissions from industry and GHG emissions from agriculture. With very ambitious resource efficiency measures, process-related GHG emissions from industry can be reduced, e.g. by substituting emission-intensive primary products (such as cement) in a targeted manner (e.g. via wood building materials) or by reducing demand overall (e.g. via new types of concrete). The additional lifestyle changes in GreenLife show the greatest effect on GHG emissions from agriculture; further reductions in the consumption of meat, milk and dairy products are particularly effective.

If greenhouse gas emissions are calculated based on a consumption perspective, i.e. greenhouse gas emissions from imports are added and emissions from exports are deducted, a similar picture emerges as with the calculation of territorial-based GHG emissions. For the consumption-based emissions, the assumption regarding the speed of transformation in the rest of the world is relevant. In GreenEe, GreenLate and GreenLife, for example, energy-related GHG emissions remain in 2050 that are generated abroad for the production of goods that are consumed domestically. These are completely eliminated in GreenMe and GreenSupreme, which means that GHG emissions in 2050 are lower in both scenarios. The difference between the least ambitious transformation path in GreenLate and the most ambitious transformation path in GreenSupreme is considerable and amounts to 173.1 - 203.5 - 29.2 million tonnes CO_{2eq} in 2030 - 2040 - 2050. Since there is no shift of greenhouse gas intensive industries to other countries in any of the Green scenarios, the difference between the scenarios from the consumption perspective is of a similar order of magnitude as the difference from the territorial perspective.

The use of primary and secondary raw materials (RMC/final domestic use) also declines in all Green scenarios. The decreases are of course smaller than for GHG emissions. For raw materials as well, the smallest decreases are found in GreenLate and the largest decreases in

GreenSupreme. In contrast to GHG emissions, there is a clearer difference between GreenMe and GreenLife in terms of raw material consumption.

By 2050, primary raw material consumption can be reduced by 70 % in the most ambitious scenario GreenSupreme, but only by 56 % in GreenLate. The differences are mainly found in the demand for abiotic raw materials (metals, non-metallic minerals, fossil fuels). This is due to differing recycling efforts, resource efficiency improvements and raw material-saving technologies, different transformation speeds domestically and abroad and, of course, different overall economic demand.

The increase in total raw material productivity is highest in GreenMe. Although the RMI declines more sharply in GreenSupreme than in GreenMe, the assumption of a liberation from growth means that GDP will not continue to grow after 2030, which leads to a somewhat lower overall increase in total resource productivity. In all scenarios, total raw material productivity grows more strongly than between 2000 and 2010.

In GreenMe, the share of secondary raw materials of total raw material demand (primary and secondary) is also highest and amounts to 38 % in 2050. This figure does not include scrap of technology metals and therefore represents a lower estimate. The share in GreenLate is much lower with only 27 %.

If the RMC in 2050 is differentiated by investments, private households, government and non-governmental organisations, particularly high differences are found in the raw material requirements for investments. These are lowest in GreenSupreme, followed by GreenMe, and highest in GreenLate. The higher share of biotic building materials in GreenMe and GreenSupreme and the lower shares of metals and non-metallic minerals are striking. The difference in the consumption of raw materials by private households is visible in the comparison of the scenarios, albeit to a lesser extent than for investments. The demand for raw materials by the state and NGOs is comparatively low, so that the differences between the Green scenarios are not as marked.

For all areas of need, primary raw material demand differs in the scenario comparison. The differences are particularly large in housing and housekeeping. New construction of buildings is accounted for in investments, but refurbishment and repairs are assigned to private households. Therefore, the assumptions on construction also have an effect on housing and housekeeping. There are also differences in other areas of need. Larger differences are evident in the field of nutrition. Surprisingly, the consumption of raw materials for nutrition is highest in the GreenSupreme scenario; this becomes understandable if leisure and tourism, the area of need to which restaurant visits are assigned, is also considered. Due to the growth exemption, less income is spent on eating out and more is eaten at home in GreenSupreme compared to other scenarios.

In all Green scenarios, the demand for the majority of raw materials under study decreases. The main exceptions are technology metals, which are needed for key technologies for the energy transition, including silicon metals and lithium. Demand for the (primary) base metals iron, copper and aluminium falls in all scenarios, most strongly in GreenSupreme and least in GreenLate. Due to low scrap content, the demand for iron, copper and aluminium scrap increases less in GreenLate than in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe and GreenLife. In GreenSupreme, the demand for scrap metals is about the same as in GreenLate.

If demand is compared with production volumes from 2018, it can be seen that demand from Germany, especially in GreenSupreme, will fall to or below one percent of the production volume for the majority of the metals under study by 2050. This corresponds roughly to the share of the

German population in the world population. The demand for lithium, in contrast, is much higher than the proportionate share. By 2040 or 2050, when electric vehicles are the common technology in the Green scenarios, demand will exceed current production by a factor of 45 to 95. Despite the savings and new technologies in GreenSupreme, demand from Germany alone is about 45 times higher than current production. Recycling is not included in the calculation and could significantly reduce demand.

In a nutshell, the scenario comparison shows that a very ambitious transformation, as in GreenSurpeme, can save an additional 4.8 billion tonnes of CO_{2eq} by 2050 and 5.7 billion tonnes of primary raw materials compared to a less ambitious transformation, as in GreenLate.

1 Einführung

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 der Vereinten Nationen, 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. Weitgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden.

In den ersten 30 Jahren bis 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 2020a). 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 um weitere 742 Millionen Tonnen Treibhausgase pro Jahr reduziert werden, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen.

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

Das Projekt RESCUE baut auf der Studie Treibhausgasneutrales Deutschland (UBA 2014) auf. Treibhausgasneutrales Deutschland beschreibt erstmalig, wie Deutschland in 2050 eine Treibhausgasreduzierung um mindestens 95 % gegenüber 1990 erreichen kann. RESCUE geht nun verschiedene Schritte weiter und untersucht:

4. Welche weiteren Optionen bestehen, um in 2050 eine 95 %ige Reduzierung von Treibhausgasemissionen zu erreichen?
5. Wie kann bzw. muss der Weg dorthin gestaltet werden?
6. 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.

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
Klimaschutzbestreben im Pfad	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch

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

1.2 Übersicht über die Szenarien

Die sechs Green-Szenarien gehen von überwiegend gleichen Rahmenannahmen aus, darunter:

- eine rückläufige Bevölkerungsentwicklung, basierend auf der 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung und dabei auf die Variante 1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ (Destatis 2015);
- eine mäßige wirtschaftliche Entwicklung mit einem durchschnittlichen BIP-Wachstum von 0,7% p.a. und in GreenSupreme von 0% p.a. zwischen 2030 und 2050;
- Fortführung des internationalen Handels mit der EU und dem Rest der Welt;
- Beschleunigte Transformation auch in der EU und im Rest der Welt; in 2050 besteht kein Unterschied zwischen dem Ambitions- und Technologieniveau in Deutschland und der EU und etwa zehn Jahren Unterschied zwischen Deutschland und dem Rest der Welt in GreenEe1 & 2, GreenLate und GreenLife bzw. kein Unterschied in GreenMe und GreenSupreme;

- keine energetische Nutzung von Primärbiomasse ab 2030;
- Keine Berücksichtigung von CCS.

Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Annahmen, die in den Berichten zu den Szenarien vertieft werden (Dittrich et al. 2020a; b; c; d; e; UBA 2019a). Die Ausrichtung der einzelnen Szenarien ist im Folgenden zusammengefasst (UBA 2020b):

GreenEe1&2, Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency (GreenEe): Basierend auf dem Projekt “Treibhausgasneutrales Deutschland 2050” und den darin getroffenen Annahmen zur Transformation Deutschlands bis 2050 werden im RESCUE-Projekt die Entwicklung der THG-Emissionen bis 2050 und die damit einhergehende Rohstoffinanspruchnahme modelliert. Der Schwerpunkt dieser Szenarien besteht darin, dass die Energieeffizienzpotenziale in allen Anwendungsbereichen weitgehend erschlossen werden.

Während in GreenEe1 die Industrie insgesamt ihre Produktionskapazitäten kontinuierlich steigert und die Exporte weiter ansteigen, erfolgt in GreenEe2 ein ausgeglichenerer globaler Handel, so dass die nationalen Produktionskapazitäten in weiten Bereichen rückläufig sind.

GreenLate, Germany – resource efficient and GHG neutral – Late transition: Auch dieses Szenario kommt der Treibhausgasneutralität nahe. Die dafür notwendigen Klimaschutzmaßnahmen werden aber im Vergleich zu GreenEe erst zu einem späteren Zeitpunkt intensiviert und sind bei der Energieeffizienz mit einem geringeren Ambitionsniveau verbunden.

GreenMe, Germany – resource efficient and GHG neutral – Material efficiency: Ergänzend zu den GreenEe-Szenarien wird hier zusätzlich ein hohes technisches Ambitionsniveau bei der Erschließung der Rohstoffeffizienzpotenziale in allen Bereichen unterstellt, etwa durch die Nutzung von Recyclingbaustoffen, verbesserten Rezyklatraten, Leichtbauweisen im Verkehr oder der Umstellung auf langlebigere Produkte.

GreenLife, Germany – resource efficient and GHG neutral – Lifestyle changes: In GreenLife wird analysiert, welchen Beitrag Verhaltensänderungen – ergänzend zu den Maßnahmen in GreenEe und GreenMe – zu Treibhausgasminderung und Ressourcenschonung leisten können. Dabei werden heute erkennbare Trends und ausgewählte Nischenansätze des umweltbewussten Verhaltens ambitioniert fortgeschrieben, etwa verstärktes Car- und Ride-Sharing.

GreenSupreme, Germany – resource efficient and GHG neutral – Minimierung von THG-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum: Hier soll ein schneller Transformationspfad in Verbindung mit den wirksamsten Annahmen aus den vorgenannten Szenarien aufgezeigt werden, um die kumulierten Treibhausgasemissionen und Rohstoffinanspruchnahme zu verringern.

1.3 Zielsetzung dieses Berichts

Die einzelnen Green-Szenarien werden in fünf Berichten detailliert hinsichtlich der Methodik, der Annahmen und der Ergebnisse beschrieben (Dittrich et al. 2020a; b; c; d; e). Die Publikation von UBA (2019a) vergleicht die Szenarien, erläutert ausführlich die Narrative und stellt die Szenarien in den politischen Kontext. Dieser Bericht fokussiert auf die zentralen Ergebnisse der sechs Szenarien, auf die Rohstoffinanspruchnahme und die Treibhausgasemissionen im Szenario-Vergleich. Dabei werden zwei Aspekte betont:

1. Zum einen die Unterschiede, die sich im Ergebnis zwischen sehr ambitionierten und wenig ambitionierten Transformationspfaden am Beispiel GreenSupreme und GreenLate ergeben.

2. Zum anderen werden auch die Ergebnisse einer sehr ambitionierten technologischen Transformation wie in GreenMe und einer sehr ambitionierten Lebensstiländerung wie in GreenLife verglichen.

1.4 Aufbau des Berichts

Der Bericht enthält zwei Ergebniskapitel. Im ersten Ergebniskapitel (Kapitel 2) werden die Treibhausgasemissionen der Szenarien vergleichend aufbereitet. Der Vergleich enthält die territorialen THG-Emissionen, die Emissionen aus der Konsumperspektive und die kumulierten THG-Emissionen.

Im zweiten Ergebniskapitel (Kapitel 3) werden die Rohstoffinanspruchnahmen in den Szenarien verglichen. Berücksichtigt werden wesentliche gesamtwirtschaftliche Rohstoffindikatoren wie den Primärrohstoffkonsum (RMC), kreislaufwirtschaftliche Indikatoren und die Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen.

Das abschließende Kapitel 4 enthält eine kurze Zusammenfassung.

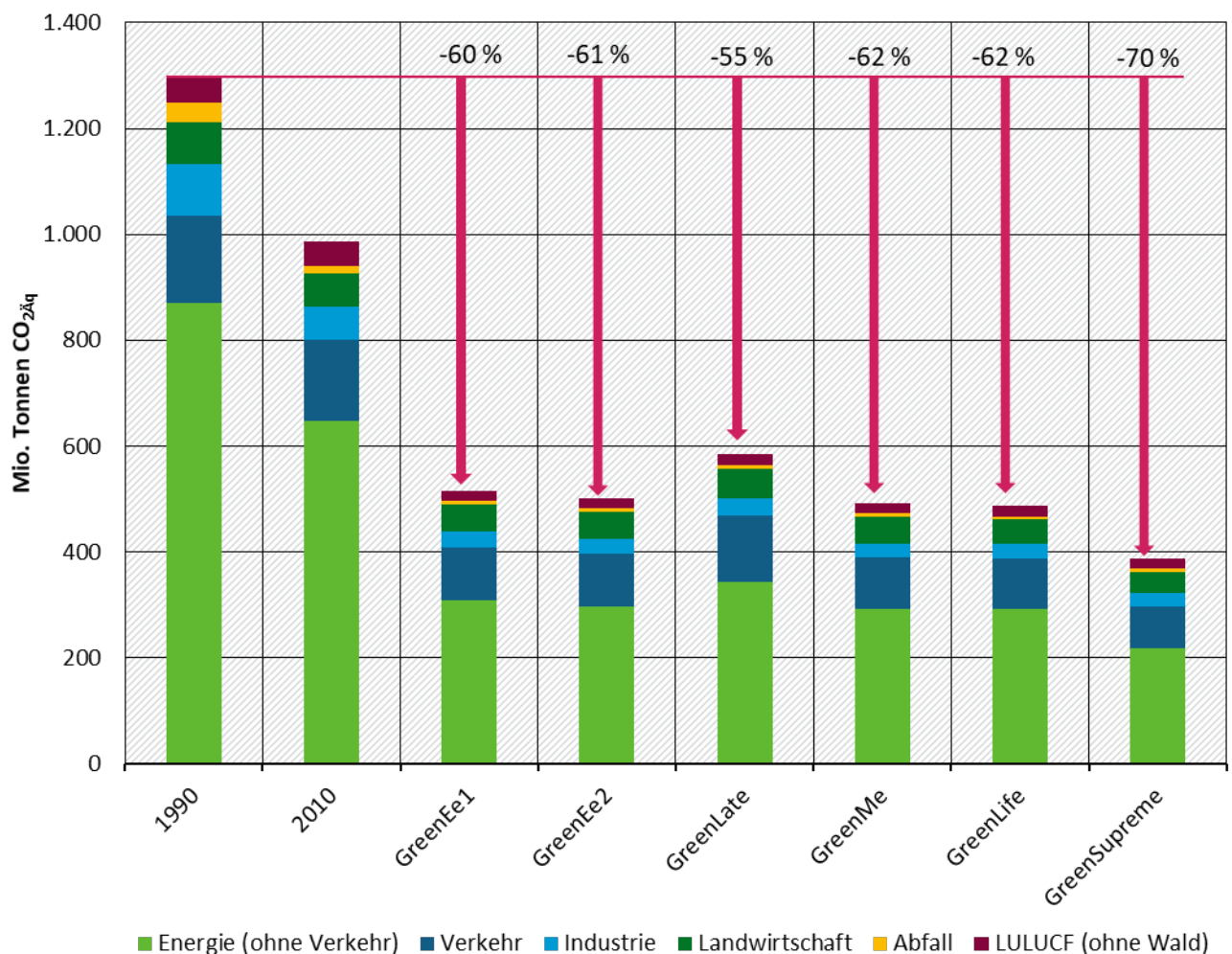
2 Treibhausgasemissionen

2.1 Treibhausgase nach Quellgruppen

Die Treibhausgasemissionen werden in allen Green-Szenarien bis 2050 um mindestens 95 % gegenüber 1990 reduziert.

Bis 2030 variieren die Rückgänge der THG-Emissionen zwischen den Szenarien, ein Resultat des unterschiedlichen Ambitionsniveaus in den Szenarien. Im GreenLate-Szenario sinken die THG-Emissionen (gerechnet nach der Systematik der Nationalen Inventarberichte) nur 54,8 %. Der Rückgang in GreenMe und GreenLife ist vergleichbar mit jeweils rund 62 %. Dies bedeutet, dass die zusätzlichen Annahmen zu Lebensstiländerungen und die zusätzlichen Annahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz im vergleichbaren Umfang zur Reduktion der THG-Emissionen beitragen. Werden beide zusätzlichen Anstrengungen kombiniert und schneller umgesetzt, ist das Einsparpotenzial erheblich. So sinken im GreenSupreme-Szenario die THG-Emissionen bereits um 70 % bis 2030 (Abbildung 1).

Abbildung 1: THG-Emissionen in 2030 gegenüber 1990 und 2010 im Szenario-Vergleich (ohne LULUCF und internationale Verkehre)



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu/IEE/SSG, Wert für 1990 und 2010 von UBA (2019b)

Bis 2050 sinken alle THG-Emissionen um mindestens 95 % gegenüber 1990. Der höchste Rückgang wird mit 96,7 % in GreenSupreme erreicht. Die THG-Emissionen liegen in 2050 im

GreenSupreme-Szenario bei nur noch 42,9 Mio. Tonnen CO₂Äq und damit 20,6 Mio. Tonnen CO₂Äq niedriger als im GreenLate-Szenario. Der Rückgang im GreenMe- und im GreenLife-Szenario ist wie bereits in 2030 auf einem ähnlichen Niveau.

Die Rechnungen beinhalten nicht die möglichen Senkenwirkungen, die durch den Wald und durch die Nutzung von Forstprodukten in Deutschland erreicht wird. Inwieweit diese die verbleibenden THG-Emissionen vollständig aufwiegen (können), muss in einem Folgeprojekt untersucht werden. Das Umweltbundesamt führt in der RESCUE-Studie dazu aus, dass durch die nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung die ambitionierten Szenarien GreenLife und GreenSupreme Netto-Null-Emissionen sicher erreichen können und selbst GreenLate diesem Anspruch nahe kommt. Unterberücksichtigung von Literatur werden folgende Spannweiten für die THG-Emissionen mit Berücksichtigung der internationalen Verkehre und LULUCF angegeben:

Tabelle 2: Treibhausgasminderung im Zielpunkt (2050) der Green-Szenarien mit Berücksichtigung von LULUCF und internationalen Verkehren

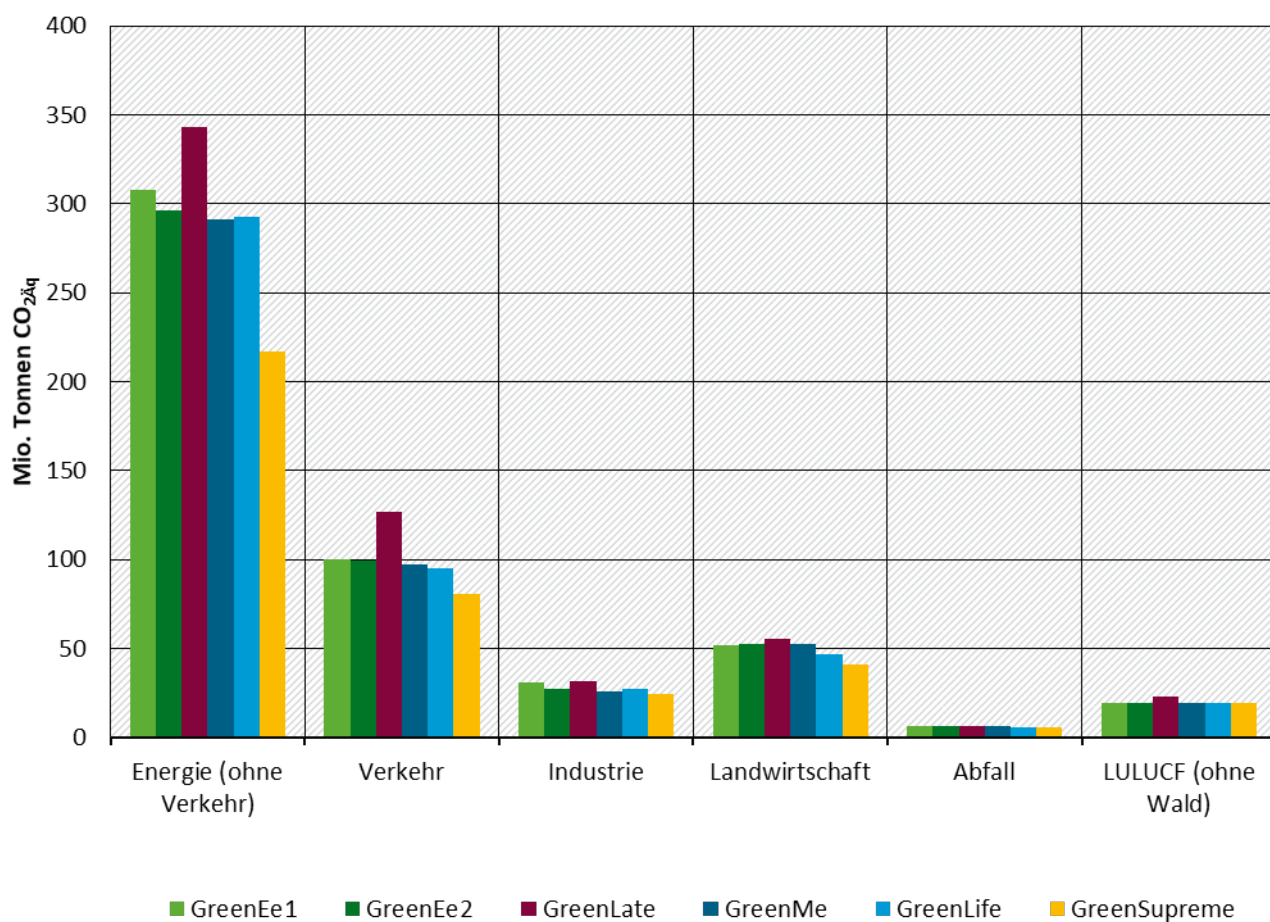
Green-Szenario	Minderung ggü. 1990 nach Berücksichtigung der angerechneten Treibhausgasemissionen	Minderung ggü. 1990 mit Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus LULUCF konservativ	Minderung ggü. 1990 mit Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus LULUCF optimistisch
GreenEe1	96,2 %	98,3 %	102,9 %
GreenLate	95,4 %	97,5 %	102,1 %
GreenEe2	96,7 %	98,8 %	103,4 %
GreenMe	96,8 %	98,9 %	103,5 %
GreenLife	97 %	99 %	103,6 %
GreenSupreme	97,1 %	99,2 %	103,8 %

Quelle: UBA (2019a)

Die folgenden Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die verbleibenden THG-Emissionen in den Jahren 2030 und 2040. Es wird deutlich, dass die (mengenmäßig) größten Unterschiede zwischen den Szenarien in 2030 durch die energie- und transportbedingten THG-Emissionen verursacht werden.

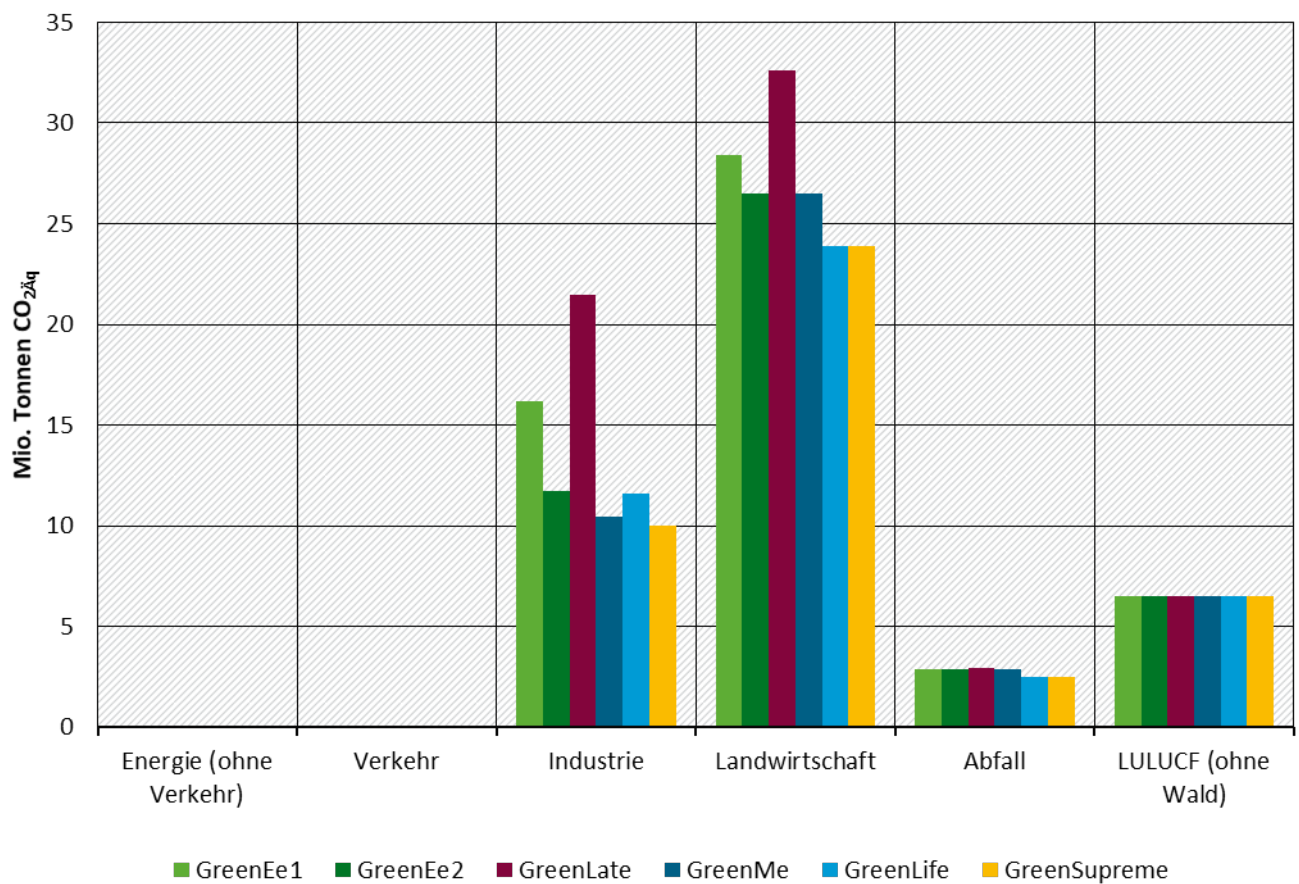
In 2050 werden in allen Green-Szenarien energie- und transportbedingte THG-Emissionen vermieden. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Szenarien resultieren aus prozessbedingten THG-Emissionen in der Industrie, gefolgt von THE-Emissionen aus der Landwirtschaft. Der Unterschied zwischen dem wenigsten ambitionierten und dem am meisten ambitionierten Szenario GreenLate und Greensupreme liegt bei 11,4 Mio. Tonnen CO₂Äq aus Industrieprozessen bzw. bei 8,7 Mio. Tonnen CO₂Äq aus der Landwirtschaft.

Abbildung 2: THG-Emissionen in 2030 nach Quellgruppen im Szenario-Vergleich



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu/IEE/SSG

Abbildung 3: THG-Emissionen in 2050 nach Quellgruppen im Szenario-Vergleich

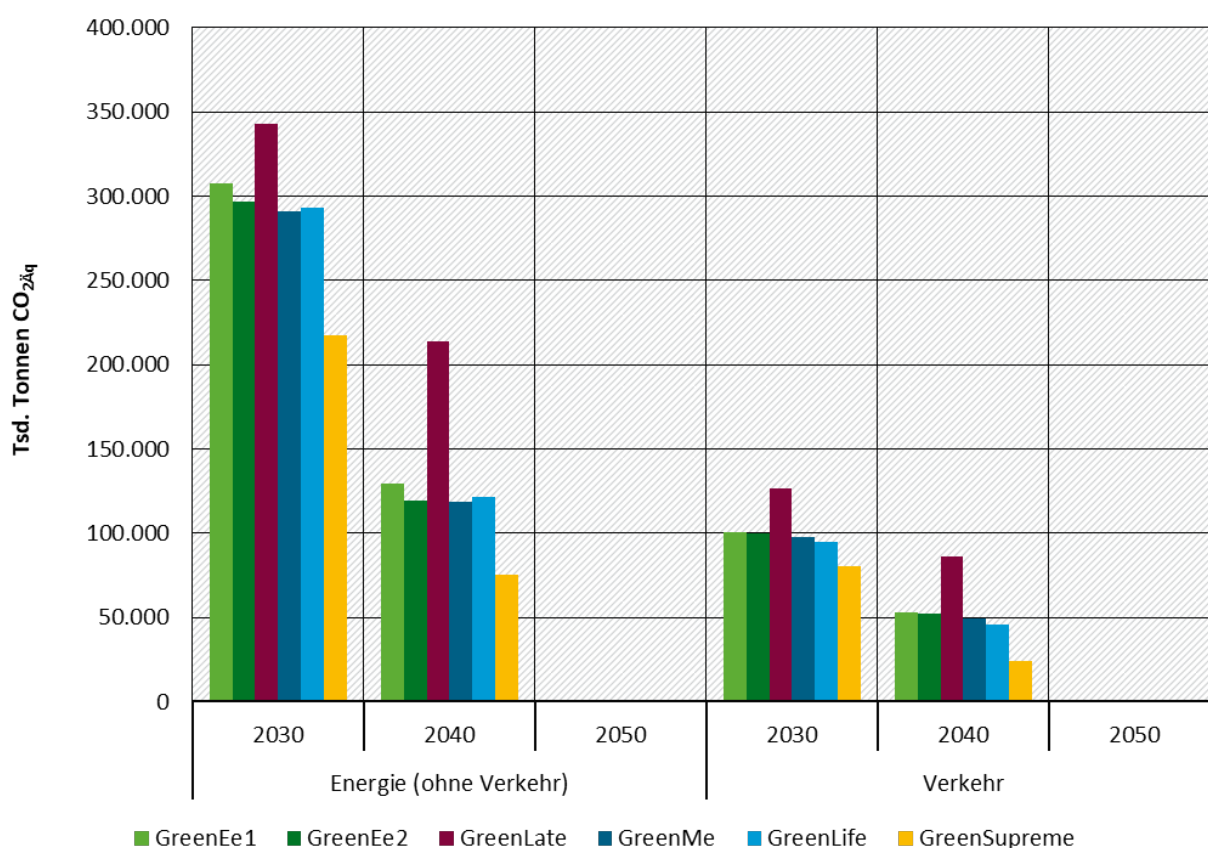


Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu/IEE/SSG

2.2 Energiebedingte Treibhausgase

Die verbleibenden THG-Emissionen im Energiebereich bzw. im nationalen Verkehr ist in folgender Abbildung 4 dargestellt. Für das Jahr 2030 liegt der Rückgang bezogen auf 1990 in diesem Sektor in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife mit 61 % bis 63 % in einer vergleichbaren Größenordnung. GreenLate weist dagegen nur einen Rückgang von 55 % auf und GreenSupreme sogar einen Rückgang von 71 %. Im Jahr 2040 liegen GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife im Bereich von 82 % bis 84 %, GreenLate dagegen bei 71 % und GreenSupreme bei 90 %. Im Jahr 2050 liegen dagegen alle Szenarien bei Null Emissionen.

Abbildung 4: THG-Emissionen Energie



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu/IEE/SSG

Die Treibhausgasemissionen im Bereich Energie ohne Verkehr, wie sie sich durch das Optimierungsmodell SCOPE ergeben haben, sind im Folgenden dargestellt. Für das Jahr 2030 weisen die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife eine fast gleiche Reduktion um 66 % gegenüber 1990 auf. GreenEe1 ist aufgrund der Handelsbilanz mit 65% leicht schlechter. GreenLate weist mit einem Rückgang von nur 61 % mit Abstand die höchsten Emissionen auf und Green Supreme mit 75 % die mit Abstand niedrigsten.

Tabelle 3: THG-Emissionen Energie 2030, ohne Verkehr

Mio.t CO ₂ Äq		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Stromerzeugung + KWK (SCOPE - endogen)	Öl-KWK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Öl-Kond	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK-KWK	21,5	23,2	21,4	13,7	14,9	0,0
	SK-Kond	13,1	14,1	13,5	10,9	12,7	0,0
	BK-KWK	8,3	8,6	9,2	7,1	9,8	0,0
	BK-Kond	17,0	16,8	19,0	14,0	19,9	0,0
	Gas-KWK	29,0	31,6	27,3	32,8	28,8	35,0
	Gas-Kond	0,4	0,8	0,2	3,4	3,0	0,8
	GT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Mio.t CO ₂ Äq		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Wärmeerzeugung außer KWK (SCOPE - endogen)	Gaskessel HH/GHD	78,3	82,7	68,6	69,7	66,3	65,5
	Ölkessel HH/GHD	6,8	12,1	6,0	6,0	5,7	6,1
	Müll-HKW	1,5	1,5	1,4	1,5	1,4	1,4
	Industrie-PW Gas	35,1	48,9	33,0	36,8	33,1	33,9
	Industrie-PW BK	2,7	3,0	2,3	2,2	2,3	2,3
	Industrie-PW SK	48,2	50,5	45,3	41,8	45,3	31,2
	Industrie-PW Öl	13,2	15,0	12,7	14,3	12,7	13,5
	Industrie-PW Ersatzbrennstoff	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3
Sonstige energetische THG-Emissionen (SCOPE - exogen)	Sonstige Strom/Wärme	30,5	31,5	29,5	29,9	29,5	25,2
	Kraftstoffe GHD	2,0	2,1	7,0	7,1	7,1	2,1
Summe		307,9	342,9	296,6	291,4	292,9	217,2
Reduktion gegenüber 1990		64,7%	60,6%	66,0%	66,6%	66,4%	75,1%

Quelle: eigene Berechnungen IEE - SCOPE, Werte für 1990 von UBA (2019b)

Auf für das Jahr 2040 weisen die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife eine fast gleiche Reduktion um 86 % gegenüber 1990 auf. GreenEe1 ist aufgrund der Handelsbilanz mit 85% leicht schlechter. GreenLate weist mit einem Rückgang von nur 75 % mit Abstand die höchsten Emissionen auf und Green Supreme mit 91 % die mit Abstand niedrigsten.

Im Jahr 2050 sind alle Treibhausgasemissionen in allen Szenarien Null.

Tabelle 4: THG-Emissionen Energie ohne Verkehr, 2040

		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Wärmeerzeugung + KWK (SCOPE - endogen)	Öl-KWK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Öl-Kond	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK-KWK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SK-Kond	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BK-KWK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BK-Kond	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gas-KWK	17,9	37,3	18,8	13,8	19,8	10,7
	Gas-Kond	2,1	14,3	2,4	1,1	3,8	0,6
	GT	0,0	6,3	0,1	0,0	1,1	0,0
Wärmeerzeugung außer KWK (SCOPE - endogen)	Gaskessel HH/GHD	33,6	46,8	28,5	27,8	25,4	23,6
	Ölkessel HH/GHD	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0
	Müll-HKW	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6

		GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
	Industrie-PW Gas	24,0	50,0	20,4	25,2	21,6	18,0
	Industrie-PW BK	0,2	1,4	0,2	0,2	0,3	0,0
	Industrie-PW SK	23,8	26,2	19,7	18,5	19,9	0,0
	Industrie-PW Öl	6,4	8,3	5,9	7,5	6,0	6,4
	Industrie-PW Ersatzbrennstoff	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1
Sonstige energetische THG-Emissionen (SCOPE - exogen)	Sonstige Strom/Wärme	18,5	19,9	17,2	17,7	17,4	15,1
	Kraftstoffe GHD	1,7	1,8	5,7	5,9	5,8	0,0
Summe		129,2	213,6	119,7	118,5	121,7	75,2
Reduktion gegenüber 1990		85,2%	75,5%	86,3%	86,4%	86,0%	91,4%

Quelle: eigene Berechnungen IEE - SCOPE, Werte für 1990 von UBA (2019b)

In folgender Tabelle sind die THG-Emissionen im Verkehr unter Berücksichtigung der Beimischung von PtL dargestellt. Zusätzlich ist informativ der internationale Verkehr dargestellt. Im Verkehr zeigt sich ein stärkerer Unterschied zwischen den Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife. So liegt die Änderung im nationalen Verkehr im Jahr 2040 bei -38 %, -40 % und -42% bezogen auf 1990. GreenLate mit dem höchsten Verbrauch (-48 %) und GreenSupreme mit dem geringsten Verbrauch (-86 %) weisen aber sehr viel höhere Unterschiede aus. GreenLate ist das einzige Szenario was 2040 noch Emissionen im internationalen Verkehr aufweist. 2050 sind alle Treibhausgasemissionen in allen Szenarien Null.

Tabelle 5: THG-Emissionen Verkehr

Mio.t CO ₂ Äq	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
National						
2010 SUMME	153,57					
Personenverkehr 2010	103,88					
Güterverkehr 2010	49,69					
2030 SUMME	100,33	126,66	99,72	97,33	94,96	85,84
2030 Benzin	28,56	38,54	28,55	27,73	26,86	24,70
2030 Diesel	69,82	85,71	69,22	67,64	66,43	59,48
2030 CNG	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09
2030 Kerosin	1,87	2,31	1,87	1,86	1,59	1,59
Personenverkehr 2030	66,37	87,43	66,36	64,30	62,76	55,90
Güterverkehr 2030	33,96	39,23	33,37	33,03	32,20	29,95
2040 SUMME	52,78	86,20	52,11	49,38	45,96	33,94
2040 Benzin	16,54	29,61	16,53	15,79	13,99	10,11
2040 Diesel	34,67	54,45	34,01	32,02	31,13	23,00

Mio.t CO ₂ Äq	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2040 CNG	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
2040 Kerosin	1,55	2,10	1,54	1,54	0,82	0,81
Personenverkehr 2040	34,10	55,60	34,08	32,62	29,16	19,34
Güterverkehr 2040	18,68	30,60	18,03	16,75	16,80	14,60
Rückgang national ggü 1990						
2010	-6,6%					
2030	-39,0%	-23,0%	-39,3%	-40,8%	-42,2%	-51,0%
2040	-67,9%	-47,6%	-68,3%	-70,0%	-72,0%	-85,5%
2050	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
International						
2010 SUMME	31,02					
2010 Flug	22,85					
2010 See	8,17					
2030 SUMME	30,34	37,25	30,69	30,16	28,27	22,80
2030 Flug	24,99	31,18	25,20	25,19	22,90	19,06
2030 See	5,36	6,07	5,49	4,97	5,37	3,74
2040 SUMME	0,00	5,54	0,00	0,00	0,00	0,00
2040 Flug	0	4,68	0	0	0	0
2040 See	0	0,85	0	0	0	0
2050 SUMME	0	0	0	0	0	0

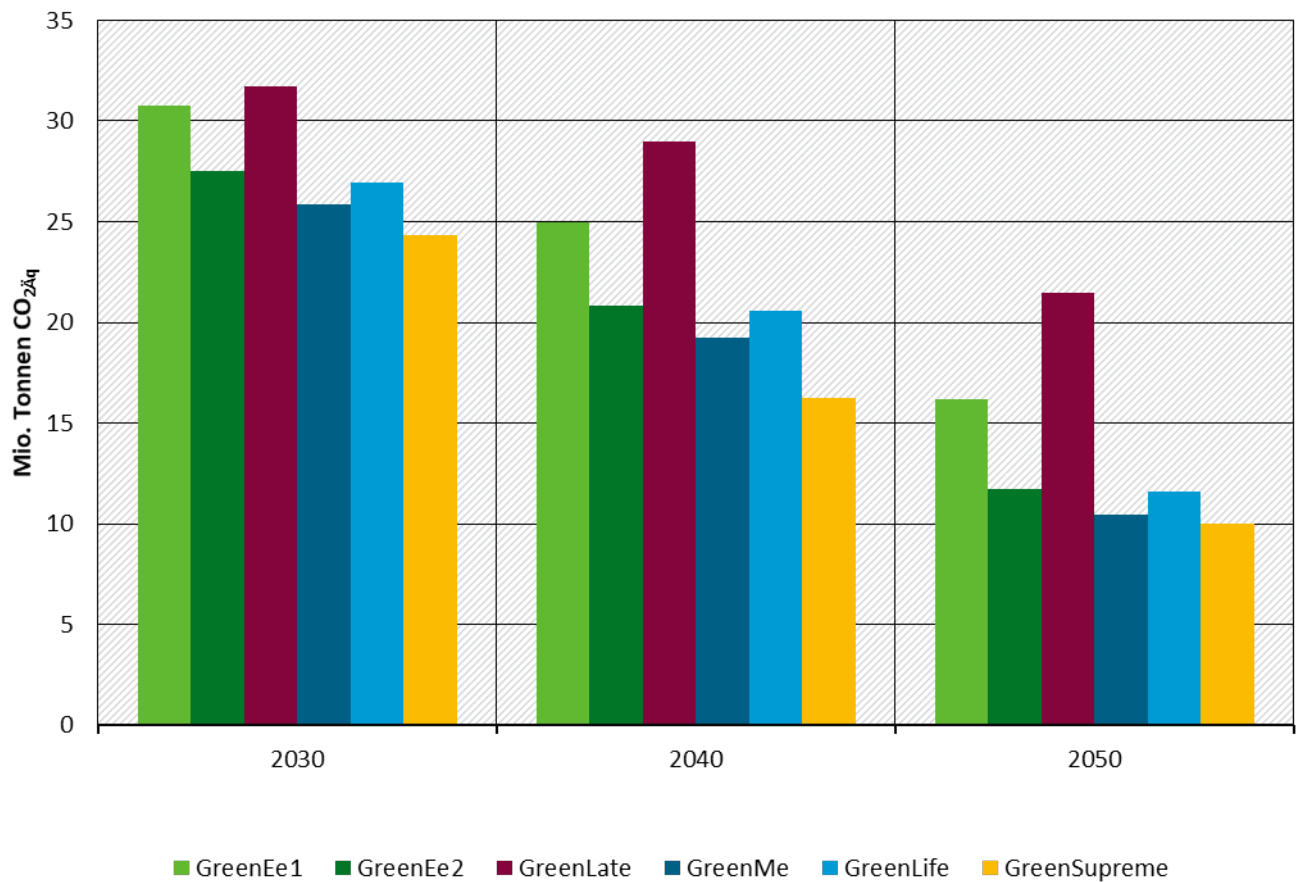
Quelle: eigene Berechnungen ifeu - TREMOD, Werte für 1990 von UBA (2019b)

2.3 Industrieprozesse

Die prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus industriellen Prozessen sind in allen Green-Szenarien rückläufig. Am langsamsten gehen die THG-Emissionen in GreenLate zurück, am schnellsten in GreenSupreme. Der Unterschied zwischen beiden Szenarien beträgt in 2030 – 2040 – 2050 rund 7,4 – 12,7 – 11,4 Mio. Tonnen CO₂Äq. Der Vergleich zwischen GreenMe und GreenLife zeigt, dass in allen untersuchten Jahren die THG-Emissionen aus Industrieprozessen in GreenMe geringer sind als in GreenLife, zurückgehend auf die höheren technischen Umstellungen im GreenMe-Szenario (Abbildung 5).

Tabelle 6 schlüsselt die prozessbedingten THG-Emissionen aus Industrieprozessen weiter auf. Die relevanteste verbleibende Quelle ist in allen Green-Szenarien die Zementindustrie, gefolgt von der Kalkindustrie. Während für metallurgische Prozesse Verfahrensumstellungen und Substitutionen (fossile Rohstoffe, z.B. für Reduktionsprozesse, werden durch synthetisch erzeugte Rohstoffe ersetzt) unterstellt sind, und somit THG-Emissionen in 2050 vollständig reduziert werden können, sind bislang keine Prozesse bekannt, die die THG-Emissionen bei der Kalk- und Zementindustrie vollständig vermeiden können.

Abbildung 5: THG-Emissionen Industrieprozesse



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu

Tabelle 6: THG-Emissionen Industrieprozesse

Mio. t CO ₂ Äq	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Eisen- und Stahlindustrie						
2030	2,74	2,67	2,77	2,61	2,65	1,98
2040	1,79	1,59	1,83	1,54	1,57	0,16
2050	0,16	0,131	0,16	0,126	0,129	0,11
Nicht-Eisen Metallindustrie						
2030	1,24	1,03	1,31	1,00	1,02	0,77
2040	0,72	0,64	0,76	0,61	0,64	0
2050	0	0	0	0	0	0
Gießereiindustrie						
2030	0	0	0	0	0	0
2040	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0
Zementindustrie						
2030	11,61	9,24	12,49	8,54	8,92	8,19
2040	11,17	7,89	13,54	7,30	7,83	6,98
2050	9,49	5,62	14,60	5,18	5,62	5,06
Glasindustrie						

Mio. t CO ₂ Äq	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2030	0,76	0,79	0,78	0,73	0,78	0,73
2040	0,64	0,63	0,67	0,58	0,61	0,56
2050	0,42	0,40	0,55	0,35	0,39	0,36
Kalkindustrie						
2030	4,51	3,91	4,51	3,63	3,79	3,47
2040	4,02	3,44	4,02	3,22	3,42	3,05
2050	3,53	2,98	3,53	2,82	2,97	2,68
Textilindustrie						
2030	0	0	0	0	0	0
2040	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0
Nahrungsmittelindustrie						
2030	0	0	0	0	0	0
2040	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0
Papierindustrie						
2030	0	0	0	0	0	0
2040	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0
Chemieindustrie						
2030	6,88	6,88	6,88	6,40	6,88	6,40
2040	4,16	4,16	5,66	3,56	4,16	3,56
2050	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0
Aluminium- und Magnesiumindustrie (F-Gase)						
2030	0,28	0,28	0,28	0,20	0,20	0,19
2040	0,29	0,29	0,29	0,21	0,19	0,18
2050	0,30	0,30	0,30	0,17	0,17	0,15
Produktion fluorierte THG-Emissionen						
2030	0,30	0,30	0,30	0,299	0,299	0,279
2040	0,32	0,32	0,32	0,319	0,319	0,220
2050	0,34	0,34	0,34	0,339	0,340	0,307
Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen						
2030	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
2040	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
2050	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Herstellung von Dämmstoffen						
2030	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
2040	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
2050	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Feuerlöschmittel						
2030	0	0	0	0	0	0
2040	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0
Aerosole und Lösemittel						
2030	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,125

Mio. t CO ₂ Äq	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2040	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,102
2050	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,122
Halbleiterproduktion						
2030	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12
2040	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,11
2050	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,10
Elektrische Betriebsmittel						
2030	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2040	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
2050	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Sonstige SF6-Anwendungen						
2030	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
2040	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
2050	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Anwendungen von Farben und Lacken						
2030	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,34
2040	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,23
2050	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,23
Entfettung sowie chemische Reinigung						
2030	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,055
2040	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,038
2050	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,043
Herstellung und Anwendung chemischer Produkte						
2030	0,088	0,088	0,088	0,088	0,088	0,082
2040	0,083	0,083	0,083	0,083	0,083	0,057
2050	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,064
Andere Anwendungen von Lösemitteln						
2030	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,49
2040	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,34
2050	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,35
Sonstige Branchen						
2030	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
2040	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
2050	0	0	0	0	0	0
Lachgas						
2030	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
2040	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
2050	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

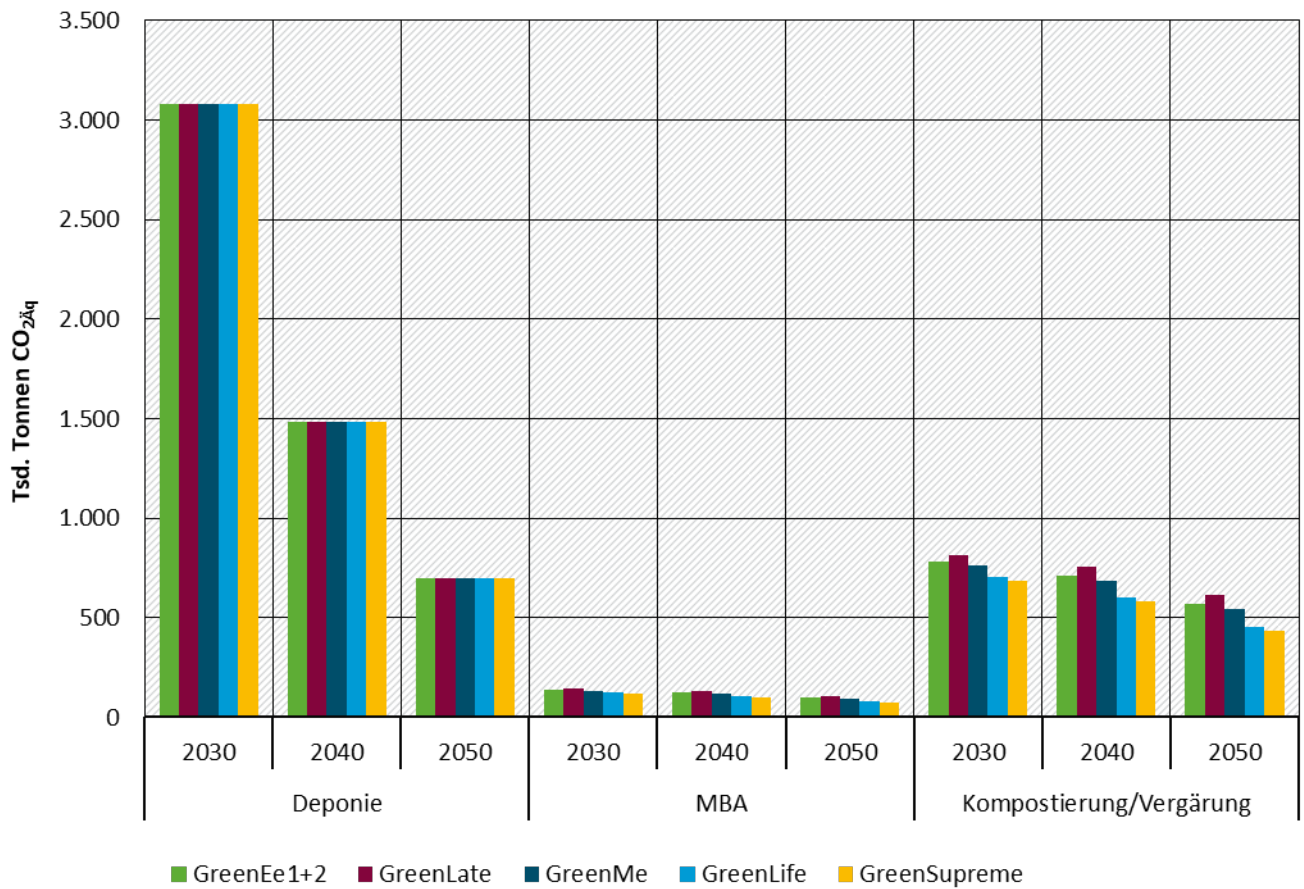
Quelle: eigene Berechnungen ifeu

2.4 Abfall und Abwasser

Die Treibhausgasemissionen aus Deponien gehen in allen Green-Szenarien gleichermaßen zurück. Der Rückgang der THG-Emissionen aus MBA/MBS und Kompostierung/Vergärung ist unter anderem abhängig von den Abfallmengen, die durch Effizienzzannahmen (GreenMe und GreenSupreme) und insbesondere durch das Konsumverhalten in GreenLife und GreenSupreme

stärker rückläufig sind als in den anderen Szenarien. Die geringeren Effizienzfortschritte in GreenLate führen zu vergleichsweise hohen Abfallmengen. Die Unterschiede zeigt Abbildung 6.

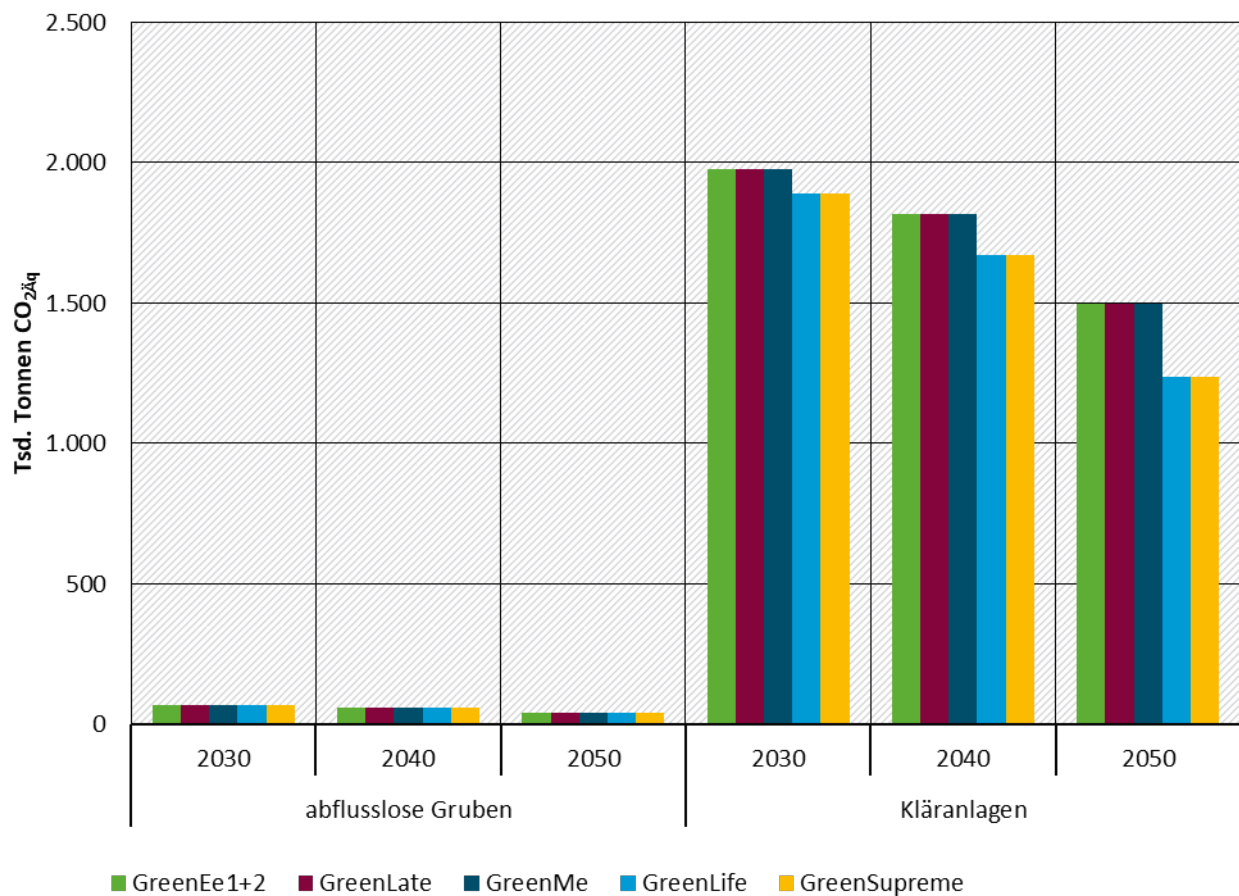
Abbildung 6: THG-Emissionen aus Deponien, MBA/MBS und Kompostierung/Vergärung



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu

Der Rückgang der THG-Emissionen aus abflusslosen Gruben ist in allen Szenarien gleich. Der Rückgang der THG-Emissionen aus Kläranlagen ist in GreenLife und GreenSupreme aufgrund der geänderten Ernährungsgewohnheiten höher als in GreenMe, GreenLate und in beiden GreenEe-Szenarien (Abbildung 7).

Abbildung 7: THG-Emissionen abflussloser Gruben und Kläranlagen



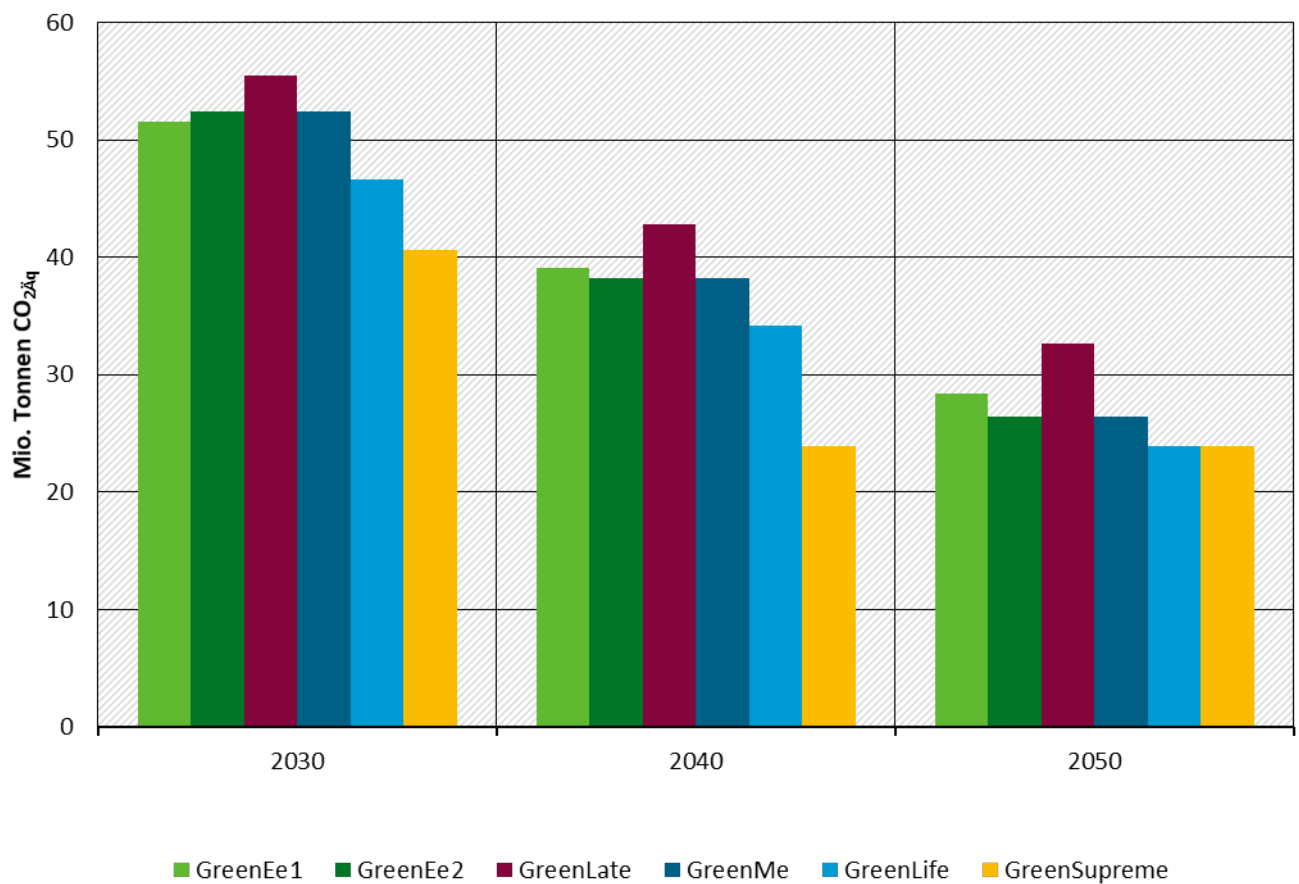
Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu

2.5 Landwirtschaft

In allen Green-Szenarien sinken die Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft. Am schnellsten sinken sie im GreenSupreme-Szenario, am langsamsten im GreenLate-Szenario. In 2050 liegen sie in GreenSupreme und GreenLife auf gleicher Höhe (Abbildung 8).

Die Rückgänge sind in Tabelle 7 nach Untergruppen aufgeschlüsselt. Die höchsten prozentualen Rückgänge erfolgen durch das verbesserte bzw. sinkende Wirtschaftsdüngermanagement bzw. die rückläufigen Tierplatzzahlen (Tierhaltung / Verdauung). Aufgrund der ambitionierteren Annahmen zur Diätumstellung sind die Rückgänge im GreenLife bzw. GreenSupreme-Szenario besonders hoch. Hohe absolute Rückgänge sind in allen Szenarien im Bereich Böden aufgrund der verbesserten Bodenbearbeitung zu finden.

Abbildung 8: THG-Emissionen Landwirtschaft in 2030, 2040 und 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu, ALMOD

Tabelle 7: THG-Emissionen nach Bereichen in der Landwirtschaft gegenüber 1990

	GreenEe1	GreenEe2 = GreenMe	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Böden in Mio. Tonnen CO₂Äq						
1990	28,76					
2030	19,26	20,84	21,28	20,84	19,53	17,17
2040	16,77	16,55	17,82	16,55	15,49	12,44
2050	14,66	13,22	15,39	13,22	12,44	12,44
Rückgang ggü 1990 in %						
2030	-33,1	-27,6	-26,0	-27,6	-32,1	-40,3
2040	-41,7	-42,5	-38,1	-42,5	-46,1	-56,8
2050	-49,0	-54,0	-46,5	-54,0	-56,8	-56,8
Tierhaltung / Verdauung in Mio. Tonnen CO₂Äq						
1990	34,66					
2030	23,23	22,56	24,64	22,56	19,27	16,49
2040	16,69	16,24	18,90	16,24	13,81	8,35
2050	10,15	9,90	13,15	9,90	8,35	8,35
Rückgang ggü 1990 in %						
2030	-70,7	-71,4	-62,1	-71,4	-75,9	-75,9

	GreenEe1	GreenEe2 = GreenMe	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2040	-62,0	-62,0	-62,0	-62,0	-62,0	-62,0
2050	-70,4	-70,4	-70,4	-70,4	-70,4	-70,4
Wirtschaftsdüngermanagement in Mio. Tonnen CO₂Äq						
1990	13,16					
2030	6,73	6,58	7,11	6,58	5,44	4,60
2040	3,57	3,22	3,89	3,22	2,67	1,00
2050	1,61	1,21	1,85	1,21	1,00	1,00
Rückgang ggü 1990 in %						
2030	-48,9	-50,0	-46,0	-50,0	-58,7	-65,1
2040	-72,9	-75,5	-70,4	-75,5	-79,7	-92,4
2050	-87,8	-90,8	-85,9	-90,8	-92,4	-92,4
Kalkung in Mio. Tonnen CO₂Äq						
1990	13,16					
2030	1,62	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74
2040	1,56	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74
2050	1,50	1,74	1,74	1,74	1,74	1,74
Rückgang ggü 1990 in %						
2030	-87,7	-86,8	-86,8	-86,8	-86,8	-86,8
2040	-88,1	-86,8	-86,8	-86,8	-86,8	-86,8
2050	-88,6	-86,8	-86,8	-86,8	-86,8	-86,8
Harnstoffausbringung in Mio. Tonnen CO₂Äq						
1990	0,48					
2030	0,53	0,50	0,53	0,50	0,49	0,49
2040	0,50	0,45	0,50	0,45	0,44	0,39
2050	0,47	0,40	0,47	0,40	0,39	0,39
Rückgang ggü 1990 in %						
2030	10,1	3,3	10,1	3,3	1,5	1,5
2040	3,9	-6,2	3,9	-6,2	-8,9	-19,4
2050	-2,3	-15,8	-2,3	-15,8	-19,4	-19,4
Andere Emissionsquellen in Mio. Tonnen CO₂Äq						
1990	0,0004					
2030	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
2040	0	0	0	0	0	0
2050	0	0	0	0	0	0
Rückgang ggü 1990 in %						
2030	46079,3	46079,3	46079,3	46079,3	46079,3	46079,3
2040	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0
2050	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0

Quelle: eigene Berechnungen ifeu - ALMOD, Werte für 1990 von UBA (2019b)

2.6 LULUCF (ohne Wald)

Die Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Landnutzung und Landnutzungsänderungen (ohne Wald und Waldprodukte) sinken bis 2050 in allen Szenarien, Unterschiede finden sich im Transformationspfad. Wichtige Gründe sind die Wiedervernässung von Mooren, die in

GreenLate langsamer verläuft als in den anderen Szenarien, sowie die rückläufige Siedlungsneuentwicklung, die in GreenLife und GreenSupreme schneller als in den anderen Szenarien verläuft. Die TGH-Emissionen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Die THG-Emissionen enthalten keinen Wald bzw. keine Waldprodukte und damit keine Senken. In 2050 ist unter Einbeziehung natürlicher Senken in den ambitionierten Szenarien, GreenSupreme, GreenLife und GreenMe sicher eine Treibhausgasneutralität, also maximal Netto-Null-THG-Emissionen, erreichbar. Selbst GreenLate kann diesen nahe kommen, siehe Tabelle 2.

Tabelle 8: THG-Emissionen aus Landnutzung und Landnutzungsänderungen (ohne Wald)

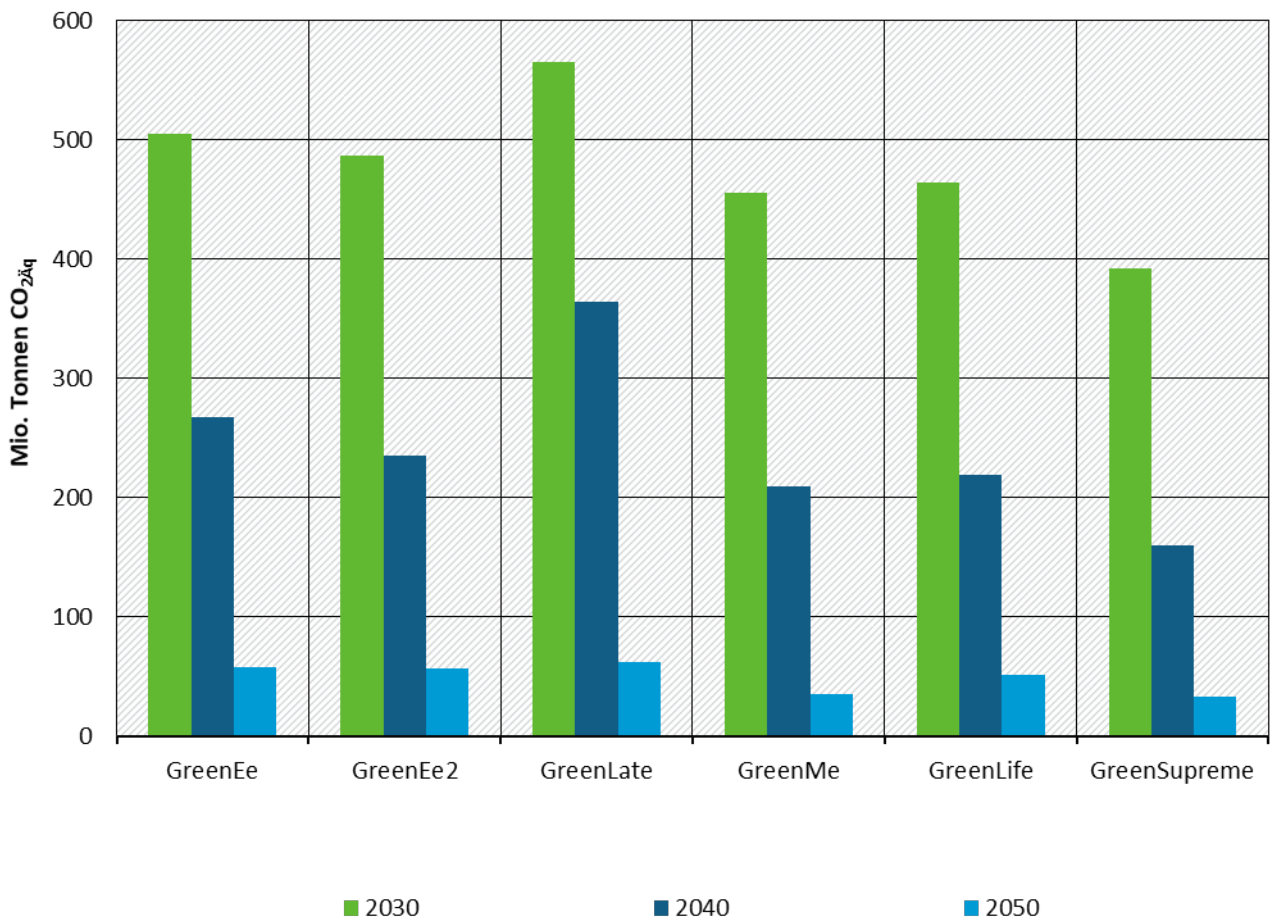
t CO ₂ Äq	2030	2040	2050
GreenEe 1+2	19.265.335	6.840.978	6.500.000
GreenLate	22.693.159	6.840.889	6.500.000
GreenMe	19.265.335	6.840.978	6.500.000
GreenLife	19.075.818	6.740.628	6.500.000
GreenSupreme	19.075.818	6.740.628	6.500.000

Quelle: eigene Darstellung eigener Berechnungen ifeu

2.7 Treibhausgase aus der Konsumperspektive

Auch die Treibhausgasemissionen, die nach der Verrechnung von Im- und Exporten in Deutschland verbleiben, sind rückläufig (Abbildung 9). Die Bilanzierung erfolgt nach dem Vorgehen in den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen und enthält keine THG-Emissionen aus LULUCF. Der Rückgang in allen Green-Szenarien ergibt sich aus der Transformation in Deutschland und aus der Transformation in Europa und im Rest der Welt. So verursachen der Konsum der privaten Haushalte, des Staates und der Nichtregierungsorganisationen sowie die Investitionen in GreenLate am meisten Treibhausgasemissionen im In- und Ausland. Der Unterschied zu GreenSupreme, das Szenario, in dem die geringsten THG-Emissionen im In- und Ausland verursacht werden, ist insbesondere im Pfad erheblich. Die Differenz in 2030 – 2040 – 2050 beträgt 173,1 – 203,5 – 29,2 Mio. Tonnen CO₂Äq.

Abbildung 9: Kumulierte Treibhausgase in den Gütern der letzten Verwendung (Konsumperspektive)



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

2.8 Kumulierte Emissionen

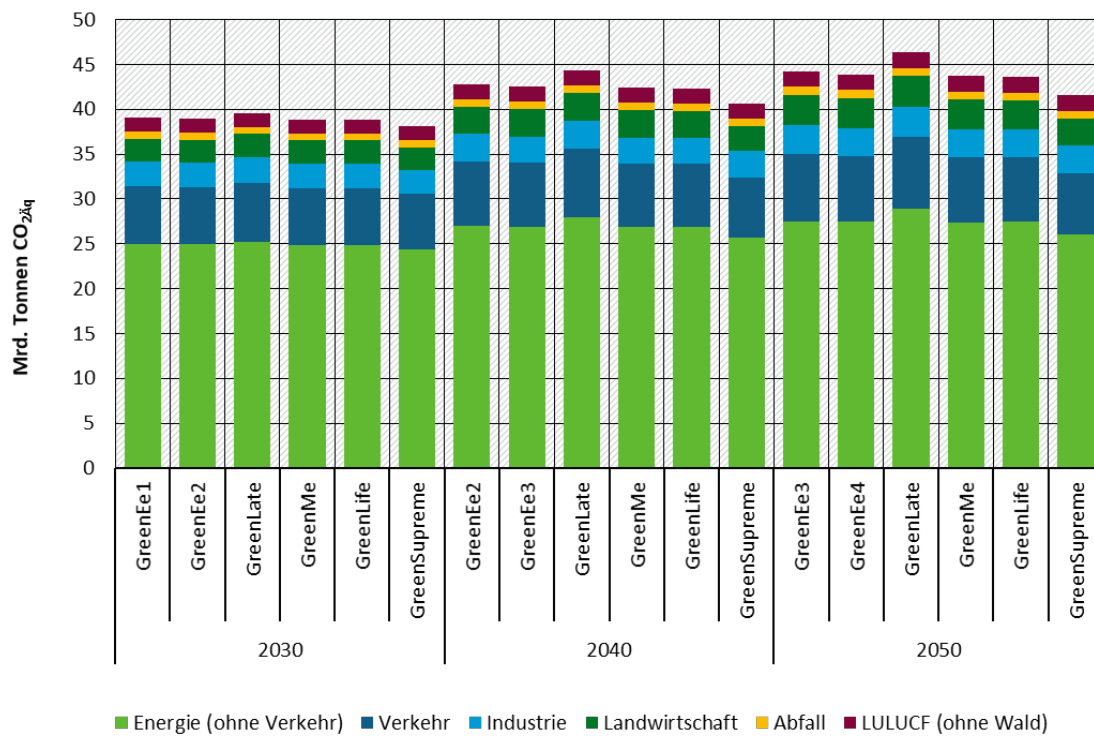
Die unterschiedlichen Ambitionsniveaus der Transformationswege führen im Ergebnis zu unterschiedlich hohen kumulierten THG-Emissionen. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die kumulierten Emissionen seit 1990 bzw. seit 2018 im Szenarien-Vergleich.

Die Unterschiede zwischen GreenMe und GreenLife sind vernachlässigbar gering. Das bedeutet, dass die THG-Emissionseinsparungen, die durch die angenommenen zusätzlichen Lebensstilveränderungen, und die Einsparungen, die durch die angenommenen zusätzlichen Ressourceneffizienzanstrengungen bewirkt werden, etwa gleich sind.

In Folge der unterschiedlichen Ambitionsniveaus bei der Transformation sind die kumulierten THG-Emissionen in GreenLate am höchsten und in GreenSupreme am niedrigsten. Die Differenz beträgt in 2030 – 2040 – 2050 rund 1,5 – 3,7 – 4,8 Mrd. Tonnen CO₂Äq.

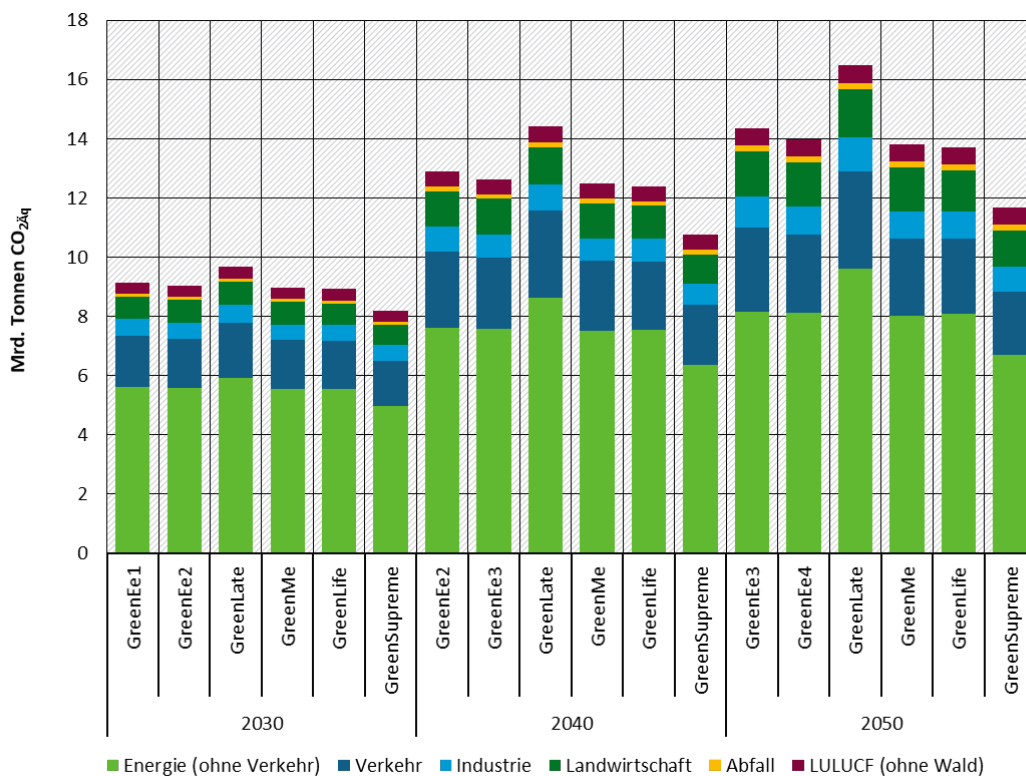
Die natürlichen Senken sowie die internationalen Verkehre sind dabei nicht mitbilanziert.

Abbildung 10: Treibhausgasemissionen, kumuliert 1990 bis 2030, 2040 und 2050



Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse ifeu

Abbildung 11: Treibhausgasemissionen kumuliert 2018 bis 2030, 2040 und 2050



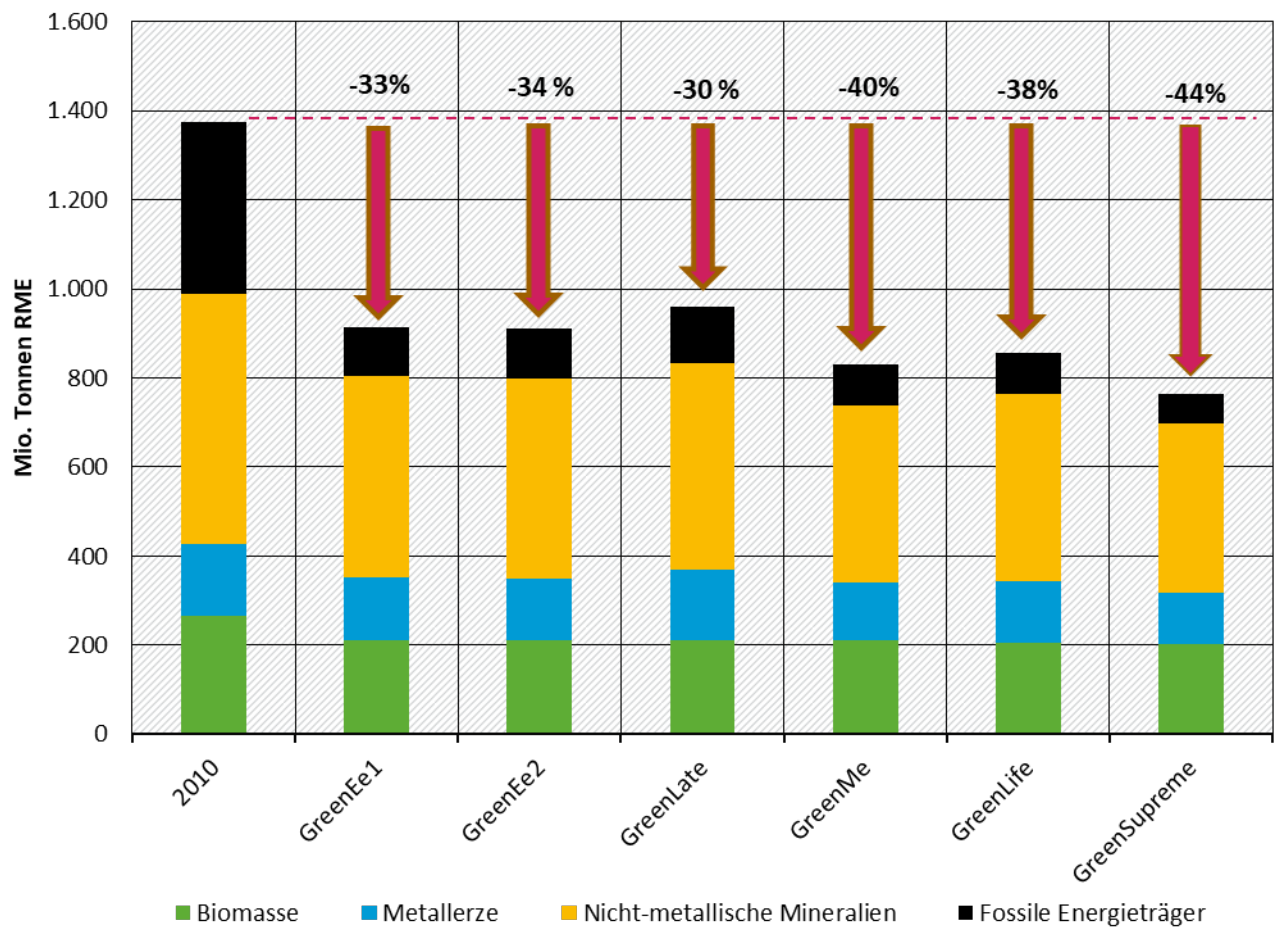
Quelle: eigene Darstellung eigener Ergebnisse, ifeu

3 Rohstoffe

3.1 Der Primärrohstoffkonsum im Vergleich

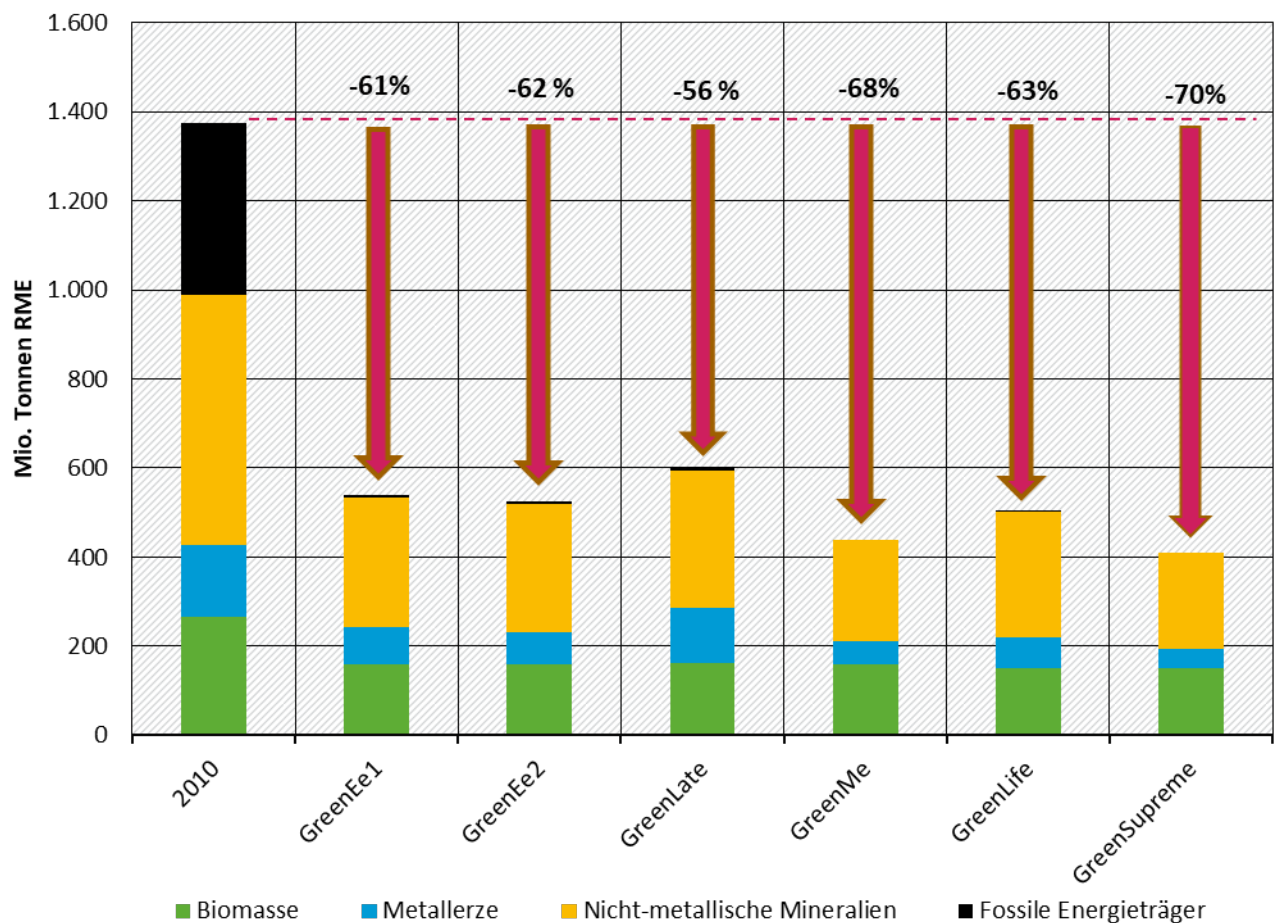
Die folgenden Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen den Rückgang des Rohmaterialkonsums in 2030 bzw. 2050 gegenüber 2010 im Szenarien-Vergleich. Die jeweils stärksten Rückgänge sind in GreenSupreme gefolgt von GreenMe zu finden. Die geringsten Rückgänge finden sich in beiden Jahren in GreenLate.

Abbildung 12: Primärrohstoffkonsum 2030 gegenüber 2010 im Szenario-Vergleich



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

Abbildung 13: Primärrohstoffkonsum in 2050 gegenüber 2010 im Szenarien-Vergleich



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

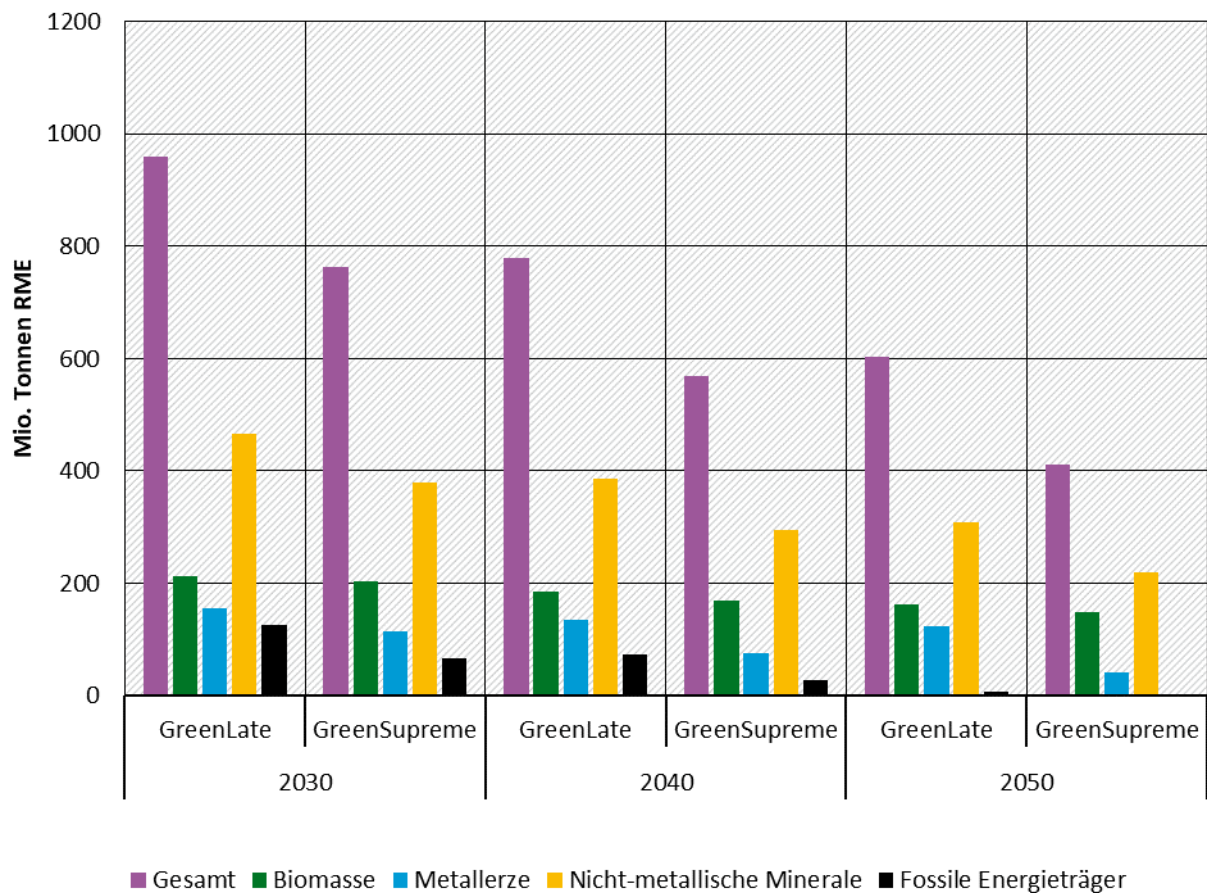
Der Unterschied zwischen GreenLate und GreenSupreme summiert sich in 2050 auf insgesamt 192,2 Mio. Tonnen Rohstoffe in Rohmaterialäquivalenten (Abbildung 14), darunter

- ▶ 13,3 Mio. Tonnen RME Biomasse
- ▶ 81,0 Mio. Tonnen RME Metallerze
- ▶ 89,8 Mio. Tonnen RME sonstige mineralische Rohstoffe und
- ▶ 8,1 Mio. Tonnen RME fossile Rohstoffe.

Zum Vergleich: das ist insgesamt etwa die Menge Rohstoffe, die Finnland insgesamt laut der UNEP – Datenbank (UNEP 2016) in 2013 konsumiert.

Die Unterschiede zwischen GreenLate und GreenSupreme gehen vor allem auf technologische Annahmen zurück, darunter höhere Materialeffizienzsteigerungen und höheren Recyclingraten, die höhere Transformationsgeschwindigkeit im Rest der Welt sowie rohstoffsparende Technologien.

Abbildung 14: Primärrohstoffkonsum GreenLate und GreenSupreme im Vergleich, 2030, 2040 und 2050



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

3.2 Der Rohmaterialinput (RMI) im Vergleich

In Tabelle 9, Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die Rohmaterialinputs (RMI) aller Szenarien enthalten. Im Gegensatz zum Rohstoffkonsum (RMC), der Im- und Exporte im Rohmaterialäquivalenten vollständig verrechnet, sind die Exporte im RMI enthalten. Bis 2030 ist in allen Szenarien vor allem der Input von fossilen Energieträgern rückläufig. Der Rückgang des Inputs von nicht-metallischen Mineralien und von Metallen verläuft stetiger. Der Rückgang des Inputs von Biomasse ist, wie bereits im Rohmaterialkonsum, in allen Szenarien geringer.

Die Unterschiede zwischen den Szenarien ähneln den Unterschieden im Rohmaterialkonsum. Die Extreme bilden GreenLate mit dem höchsten Rohmaterialinput auf der einen Seite und GreenSupreme mit dem geringsten Rohmaterialinput in allen untersuchten Jahren. In 2050 benötigt die Wirtschaft insgesamt 37% weniger Materialien in GreenSupreme im Vergleich zu GreenLate (Abbildung 15), darunter

- ▶ 12,0 % weniger Biomasse
- ▶ 56,4 % weniger Metallerze
- ▶ 26,7% weniger sonstige mineralische Rohstoffe und

- 100% weniger fossile Rohstoffe.

Tabelle 9: Rohmaterialinput 2010 und 2030 in allen Green-Szenarien in Mio. Tonnen RME

	2010	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green Supreme
Primärrohstoffe Insgesamt	2.690,6	1.840,6	1.806,8	1.939,8	1.716,8	1.703,5	1.565,3
Biomasse	422,7	373,4	373,5	391,2	379,4	349,9	346,9
Metallerze	664,1	611,1	582,5	647,1	577,8	580,2	527,0
Nicht-metallische Mineralien	837,9	663,9	654,1	683,6	602,3	620,9	573,0
Fossile Energieträger	765,8	192,1	196,7	217,9	157,2	152,4	118,4

Rückgang 2030 gegenüber 2010 in %

Primärrohstoffe Insgesamt		-31,6	-32,8	-27,9	-36,2	-36,7	-41,8
Biomasse		-11,7	-11,6	-7,4	-10,2	-17,2	-17,9
Metallerze		-8,0	-12,3	-2,6	-13,0	-12,6	-20,6
Nicht-metallische Mineralien		-20,8	-21,9	-18,4	-28,1	-25,9	-31,6
Fossile Energieträger		-74,9	-74,3	-71,5	-79,5	-80,1	-84,5

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – URMOD

Tabelle 10: Rohmaterialinput in 2010 und 2040 in allen Green-Szenarien in Mio. Tonnen RME

	2010	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Primärrohstoffe Insgesamt	2.690,6	1.473,5	1.423,8	1.655,5	1.335,4	1.365,0	1.249,0

Biomasse	422,7	328,5	328,8	351,7	336,3	306,4	301,6
Metallerze	664,1	474,6	443,7	561,0	411,6	438,8	402,2
Nicht-metallische Mineralien	837,9	582,0	567,9	603,5	505,2	538,2	483,2
Fossile Energieträger	765,8	88,4	83,4	139,1	82,3	81,7	62,0

Rückgang 2040 gegenüber 2010 in %

Primärrohstoffe Insgesamt		-45,2	-47,1	-38,5	-50,4	-49,3	-53,6
Biomasse		-22,3	-22,2	-16,8	-20,4	-27,5	-28,7
Metallerze		-28,5	-33,2	-15,5	-38,0	-33,9	-39,4
Nicht-metallische Mineralien		-30,5	-32,2	-28,0	-39,7	-35,8	-42,3
Fossile Energieträger		-88,5	-89,1	-81,8	-89,3	-89,3	-91,9

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – URMOD

Tabelle 11: Rohmaterialinput in 2010 und 2050 aller Green-Szenarien in Mio. Tonnen RME

	2010	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Primärrohstoffe Insgesamt	2.690,6	1.228,0	1.164,4	1.466,2	985,6	1.131,3	921,9
Biomasse	422,7	288,8	288,9	316,1	282,1	278,7	278,1
Metallerze	664,1	426,6	380,7	593,1	298,5	370,3	258,6
Nicht-metallische Mineralien	837,9	489,7	472,0	525,7	405,0	463,7	385,2

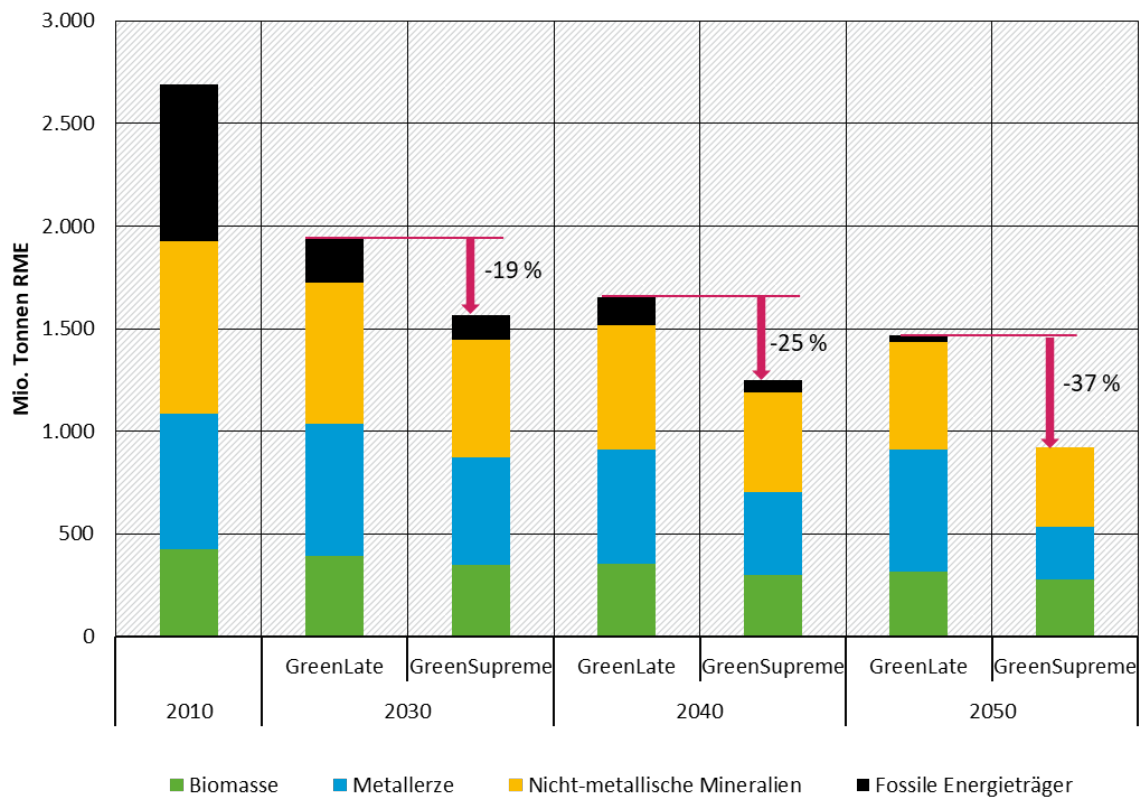
Fossile Energieträger	765,8	22,9	22,7	31,3	0,0	18,5	0,0
------------------------------	-------	------	------	------	-----	------	-----

Rückgang 2050 gegenüber 2010 in %

Primärrohstoffe Insgesamt		-54,4	-56,7	-45,5	-63,4	-58,0	-65,7
Biomasse		-31,7	-31,6	-25,2	-33,3	-34,1	-34,2
Metallerze		-35,8	-42,7	-10,7	-55,0	-44,2	-61,1
Nicht-metallische Mineralien		-41,6	-43,7	-37,3	-51,7	-44,7	-54,0
Fossile Energieträger		-97,0	-97,0	-95,9	-100,0	-97,6	-100,0

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – URMOD

Abbildung 15: Rohmaterialinput (RMI) GreenLate und GreenSupreme im Vergleich in 2030, 2040 und 2050



Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – URMOD

3.3 Gesamtrohstoffproduktivität im Vergleich

Die folgende Tabelle 12 zeigt die jahresdurchschnittlichen Veränderungen der Gesamtrohstoffproduktivität (LV/RMI) im Szenario-Vergleich. Die geringsten Zuwächse sind in GreenLate zu verzeichnen. Die höchsten jahresdurchschnittlichen Zuwächse finden sich in GreenMe. In GreenSupreme sinkt der Rohmaterialinput zwar schneller als in GreenMe, allerdings wächst das BIP aufgrund der Annahme zur Wachstumsbefreiung ab 2030 nicht, so dass die durchschnittlichen Wachstumsraten der Rohstoffproduktivität geringer als in GreenMe sind. Der Vergleich zwischen GreenMe und GreenSupreme ist ein schönes Beispiel dafür, dass relative Indikatoren wie die Gesamtrohstoffproduktivität ohne absolute Werte (wie den RMI oder den RMC) nicht alleine ausreichend richtungssicher in Bezug auf die Rohstoffinanspruchnahme sind.

In allen Szenarien liegt das durchschnittliche Wachstum der Gesamtrohstoffproduktivität über den Wachstumsraten zwischen 2000 und 2010 und ist damit ambitionierter als die Ziele in ProgRess II und ProgRess III (BMU 2020; BMUB 2016).

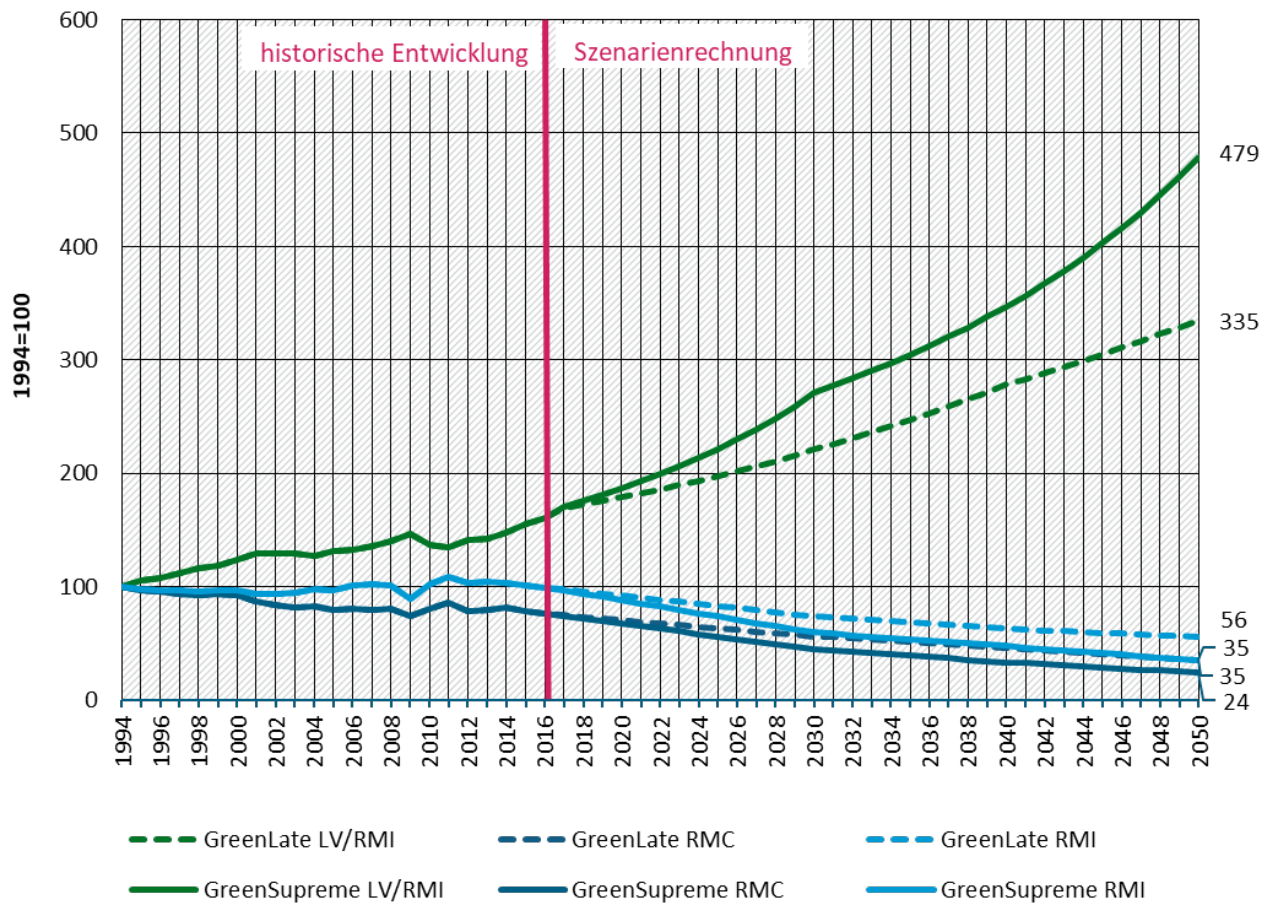
Tabelle 12: Gesamtrohstoffproduktivität, historisch und in den Szenariojahren, jahresdurchschnittliche Veränderung in %

	1994-2000	2000-2010	2010-2030	2030-2040	2040-2050
historisch	3,6	1,3			
GreenEe1			2,7	2,7	2,5
GreenEe2			2,8	2,9	2,7
GreenLate			2,4	2,1	1,9
GreenMe			3,1	3,0	3,8
GreenLife			3,1	2,7	2,6
GreenSupreme			2,7	2,1	3,1

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

Abbildung 16 zeigt, wie sich der RMC, RMI und die Gesamtrohstoffproduktivität in GreenLate und GreenSupreme im Zeitverlauf unterscheiden. Der RMI bzw. RMC liegt in 2050 in GreenSupreme um 21 bzw. 11 Indexpunkte niedriger als in GreenLate – jeweils bezogen auf die Entwicklung seit 1994. Der Unterschied der Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität ist bemerkenswert mit 144 Indexpunkten in 2050.

Abbildung 16: RMC, RMI und Gesamtrohstoffproduktivität GreenLate und GreenSupreme im Vergleich, 1994 bis 2050



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

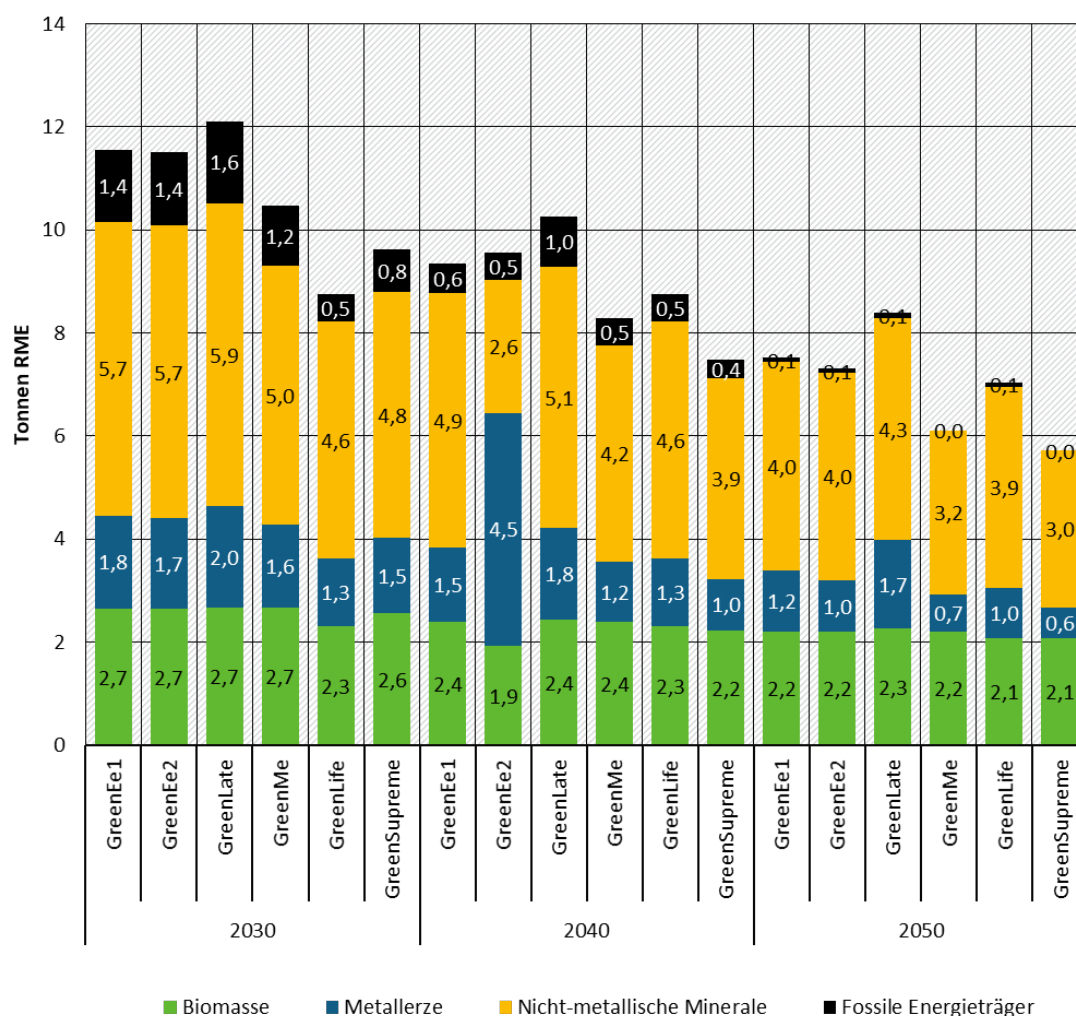
3.4 RMC pro Kopf im Vergleich

In allen Szenarien wurde dieselbe Bevölkerungsprognose unterstellt. Entsprechend geht die Rohstofffinanzspruchnahme pro Kopf wie die gesamtwirtschaftliche Rohstofffinanzspruchnahme zurück. Der Rückgang, dargestellt in Abbildung 17, resultiert in 2050 in

- ▶ 7,5 Tonnen RME in GreenEe1
- ▶ 7,3 Tonnen RME in GreenEe2
- ▶ 8,4 Tonnen RME in GreenLate
- ▶ 6,1 Tonnen RME in GreenMe
- ▶ 7,0 Tonnen RME in GreenLife und
- ▶ 5,7 Tonnen RME in GreenSupreme.

Zum Vergleich: Der durchschnittliche Rohstoffkonsum lag in 2010 bei 16,8 Tonnen RME pro Person in Deutschland.

Abbildung 17: Primärrohstoffkonsum pro Person nach Rohstoffgruppen in 2030, 2040 und 2050



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

3.5 Sekundärrohstoffe im Vergleich

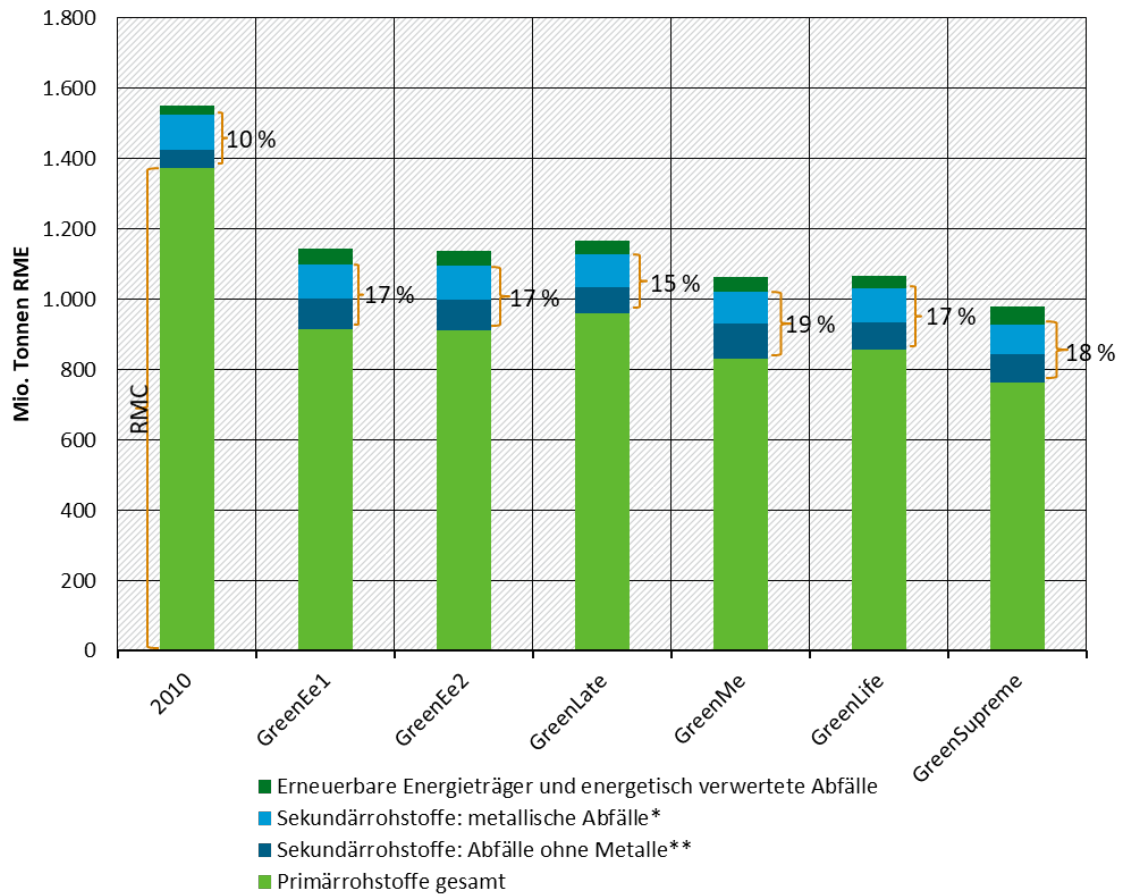
In allen GreenSzenarien wurde die Wiederverwertung von Abfällen unterstellt; dies umfasst Metalle ebenso wie mineralische Rohstoffe (Glas, Bauschutt), Papier, Holz und Kunststoffe. Der Umfang der Wiederverwertung unterscheidet sich jedoch in den Szenarien. Die geringsten Steigerungen der Recyclingraten sind in GreenLate unterstellt, die höchsten in GreenMe und in GreenSupreme.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 18 und Abbildung 19) ist die Inanspruchnahme der Primär- und Sekundärrohstoffe abgebildet, die Sekundärrohstoffe wurden dabei in Rohmaterialäquivalente umgerechnet. Das bedeutet, die Höhe zeigt die Menge Primärrohstoffe, die durch die Nutzung der Sekundärrohstoffe eingespart wurde. Der Anteil der Sekundärrohstoffe an allen genutzten Gesamtrohstoffen (primär und sekundär) ist ein Indikator der gesamtwirtschaftlichen Zirkularität.

Sowohl in 2030 als auch in 2050 liegt der Anteil der Sekundärrohstoffe an allen genutzten Rohstoffen im GreenLate-Szenario am niedrigsten. Die höchsten Anteile sind in GreenMe zu finden, gefolgt von GreenSupreme. Dies liegt daran, dass die Gesamtrohstoffinanspruchnahme in GreenSupreme geringer ist als in GreenMe und nicht rezyklierbare Rohstoffe (z.B. für

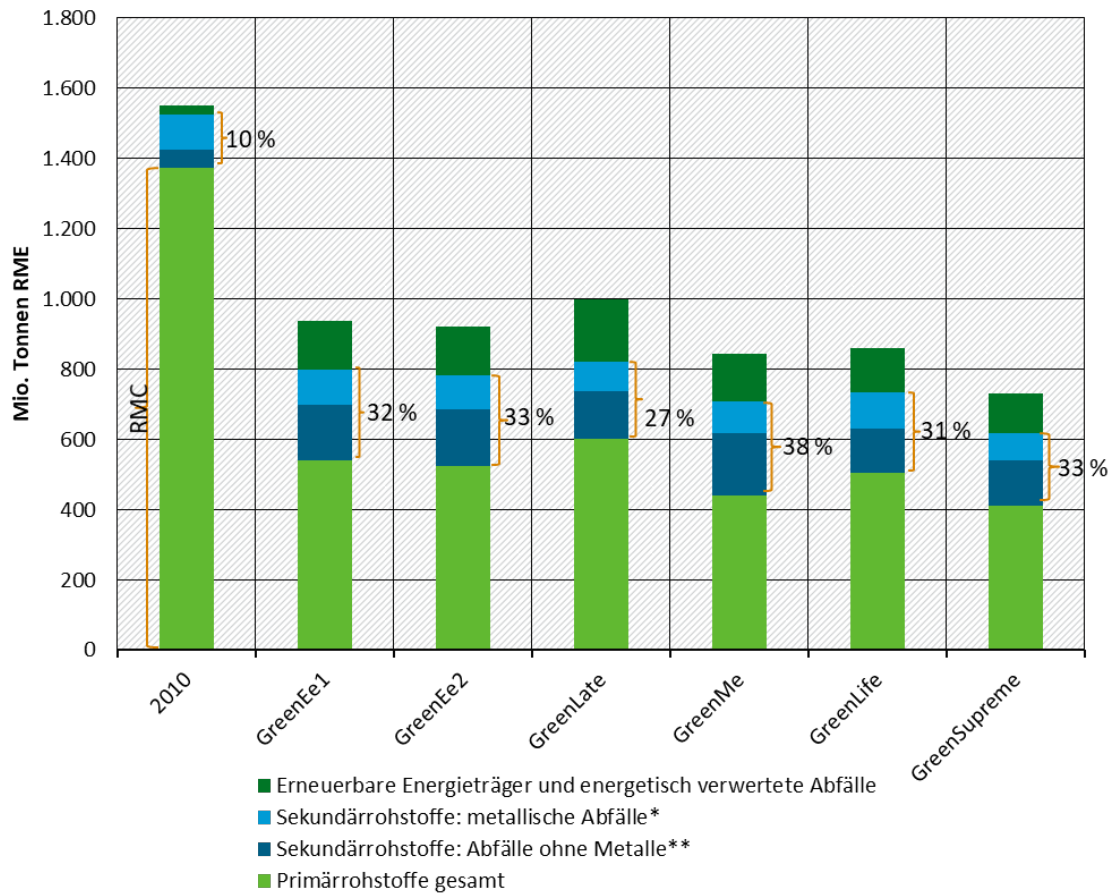
Nahrungsmittel) einen höheren Anteil haben. In GreenMe liegt der Anteil der Sekundärrohstoffe in 2050 bei 38%. Da in der Rechnung zwar die Massenmetalle, jedoch nicht Technologiemetallschrotte enthalten sind, ist die Zirkularitätsrate in allen Szenarien unterschätzt.

Abbildung 18: Primär- und Sekundärrohstoffe 2030 gegenüber 2010 im Szenarien-Vergleich



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – URMOD; *Eisen, Kupfer und Aluminium; ** Holz, Papier, Kunststoffe und mineralische Abfälle zur Verwertung im Hoch- und Tiefbau, ohne Abfälle, die direkt auf der Baustelle verwertet wurden (sog. Closed loops)

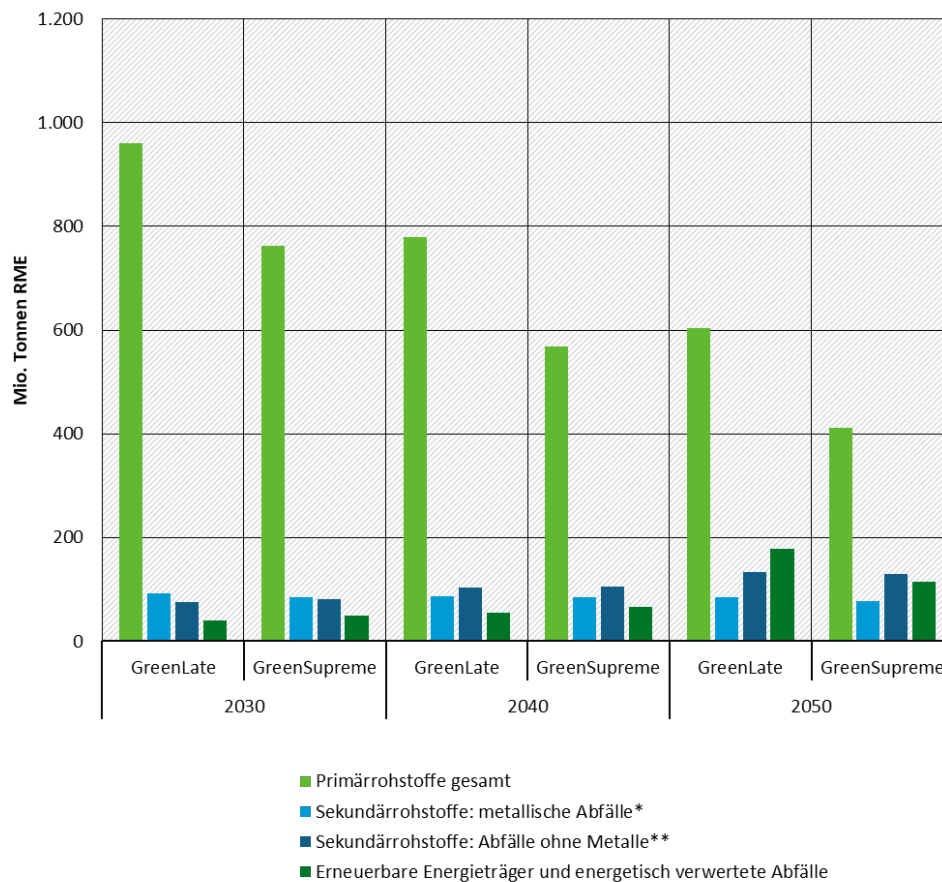
Abbildung 19: Primär- und Sekundärrohstoffkonsum in 2050 gegenüber 2010 im Szenario-Vergleich



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – URMOD; *Eisen, Kupfer und Aluminium; ** Holz, Papier, Kunststoffe und mineralische Abfälle zur Verwertung im Hoch- und Tiefbau, ohne Abfälle, die direkt auf der Baustelle verwertet wurden (sog. Closed loops)

Die Nachfrage nach Sekundäranteilen wurden ausgehend von der Nachfrage und den in den Szenarien unterstellten Recyclinganteilen berechnet, nicht jedoch von der Angebotsseite kommend (außer bei den Baustoffen). Die folgende Abbildung 20 zeigt den direkten Vergleich zwischen GreenLate und GreenSupreme. Durch den insgesamt rückläufigen Bedarf an Rohstoffen sinkt auch die Nachfrage nach Sekundärrohstoffen in GreenSupreme. Dies ist insbesondere bei Metallschrotten relevant, da auch diese nicht unbegrenzt zur Verfügung stehen.

Abbildung 20: Primär- und Sekundärrohstoffkonsum GreenLate und GreenSupreme im Vergleich



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – URMOD; *Eisen, Kupfer und Aluminium; ** Holz, Papier, Kunststoffe und mineralische Abfälle zur Verwertung im Hoch- und Tiefbau, ohne Abfälle, die direkt auf der Baustelle verwertet wurden (sog. Closed loops)

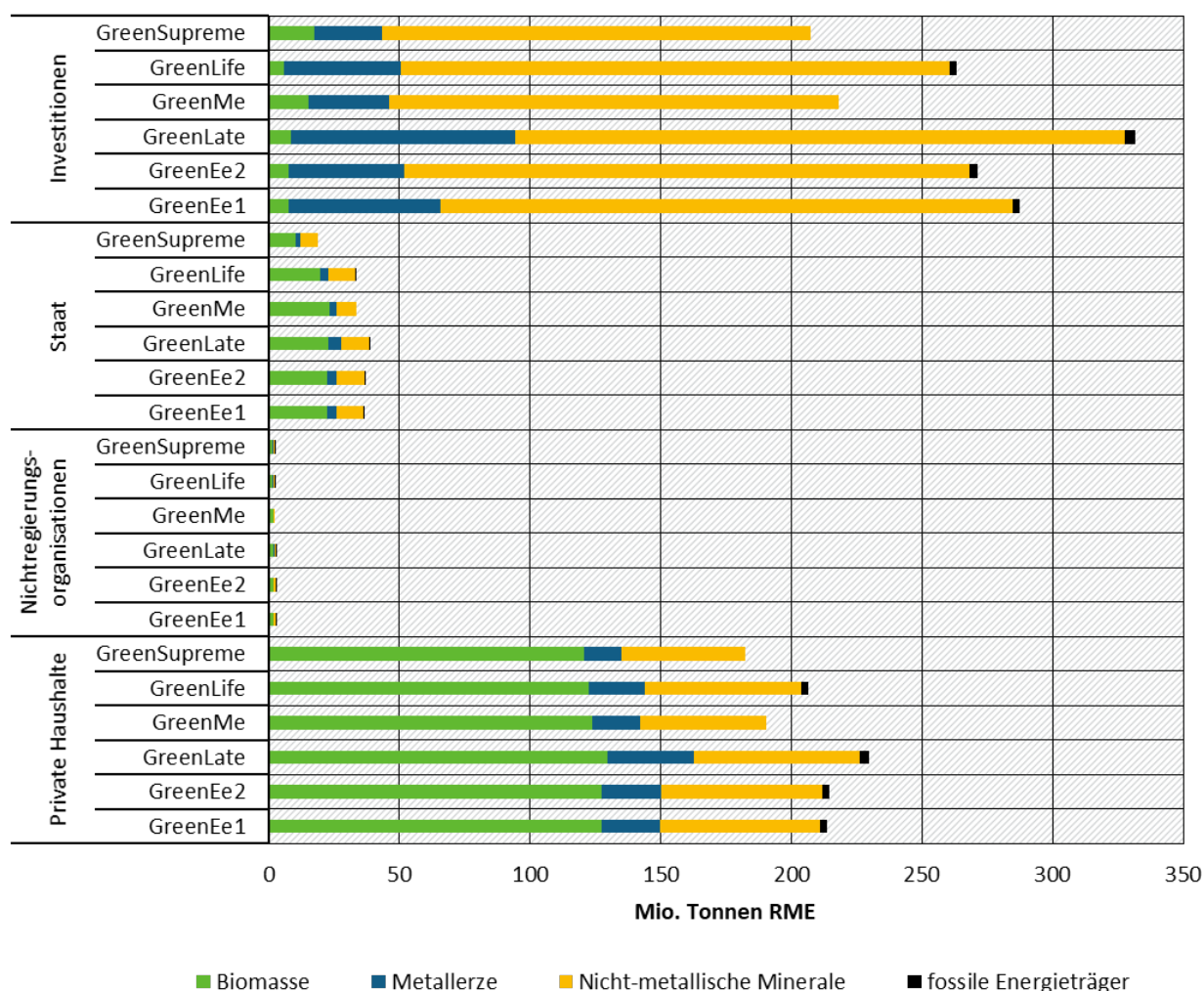
3.6 Investitionen und die Nachfrage von privaten Haushalten, Staat und NRO im Vergleich

In allen Szenarien werden in 2050 die meisten Primärrohstoffe für Investitionen genutzt, gefolgt von den privaten Haushalten. Der Primärrohstoffkonsum des Staates und der Nichtregierungsorganisationen ist vergleichsweise gering (Abbildung 21).

Bei den Investitionen fallen große Unterschiede bei der Nachfrage nach Metallen und nicht-metallischen Mineralien auf. Die geringeren Recyclingraten sind ein wesentlicher Grund für die im Szenarien-Vergleich große Nachfrage in GreenLate. Die Substitutionen abiotischer Baumaterialien durch biotische Materialien sowie die vollständige Defossilisierung in GreenMe und GreenSupreme wird an der Nachfrage nach Biomasse und nach fossilen Energieträgern (gleich null) sichtbar.

Das sehr hohe Ambitionsniveau der Transformation in GreenSupreme führt zum niedrigsten Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte. Das im Gegensatz dazu geringere Ambitionsniveau in GreenLate bewirkt einen um 26 % höheren Primärrohstoffkonsum in 2050. Interessanterweise nehmen die privaten Haushalte in GreenMe weniger Rohstoffe in Anspruch als in GreenLife. Die Gründe hierfür werden weiter unten anhand der Differenzierung nach Bedürfnisfeldern erläutert.

Abbildung 21: Primärrohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung in 2050



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

3.7 Bedürfnisfelder im Vergleich

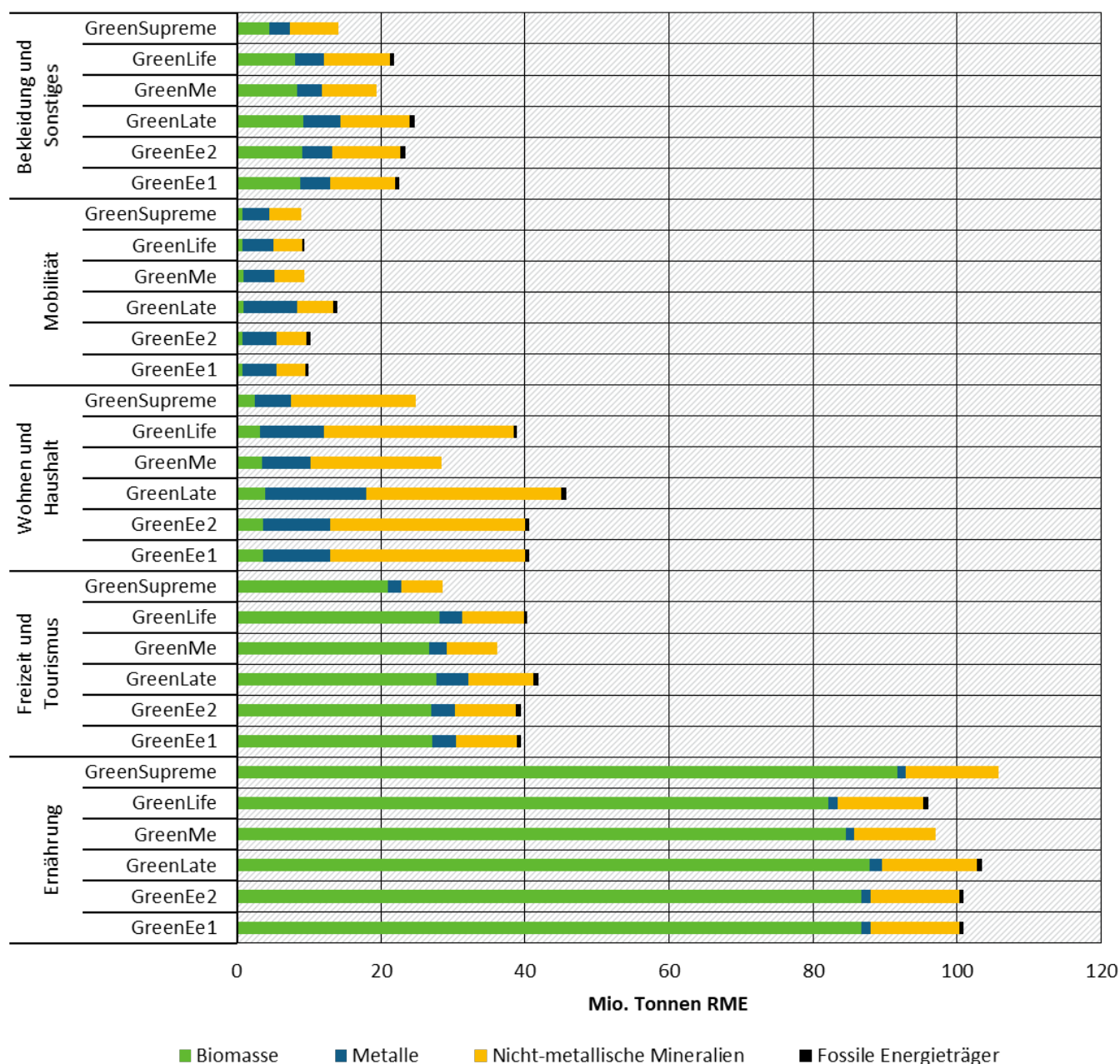
Die folgende Abbildung 22 zeigt die Primärrohstofffinanzpruachnahme der privaten Haushalte nach Bedürfnisfeldern im Szenarien-Vergleich für das Jahr 2050, aufgeschlüsselt nach Rohstoffarten.

Die Nachfrage nach Rohstoffen im Bedürfnisfeld Ernährung ist in GreenSupreme am höchsten. Dies zunächst erstaunliche Ergebnis ist auf die Annahme der Wachstumsbefreiung zurückzuführen: Die Nahrungsmenge in GreenSupreme und GreenLife ist in 2050 pro Person gleich, unterschiedlich ist aber, wo die Menschen die Nahrung zu sich nehmen. In GreenLife steigt die Nachfrage nach Restaurantbesuchen mit dem steigenden Einkommen, entsprechend ist die Rohstoffnachfrage (und dabei insb. nach biotischen Rohstoffen) im Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus höher. In GreenSupreme hingegen steigt das Einkommen pro Person weniger stark und Menschen essen weniger außer Haus und mehr zu Hause als in GreenLife.

Mit Ausnahme der Ernährung ist die Primärrohstofffinanzpruachnahme in allen Bedürfnisfeldern im GreenSupreme-Szenario am geringsten und GreenLate am höchsten, die Gründe sind vielfach benannt und sollen hier nicht noch einmal wiederholt werden. Interessant ist beim Vergleich der Primärrohstofffinanzpruachnahme nach Bedürfnisfeldern zwischen den Szenarien, dass in den

meisten Bedürfnisfeldern die technischen Anstrengungen zur Materialeinsparung stärkere Auswirkungen haben als die Lebensstiländerungen. So wirken sich rohstoffsparende EE-Technologien sowie Substitutionseffekte und Rohstoffeffizienz im Baubereich (bei Sanierungen) im Bedürfnisfeld Wohnen stärker auf diesen Indikator aus als langlebigere Möbel und weitere Energieeinsparungen. Rohstoffaufwendungen für den Neubau von Gebäuden werden nicht bei privaten Haushalten bzw. im Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt gezählt, sondern als Investition.

Abbildung 22: Primärrohstoffkonsum nach Bedürfnisfelder und Rohstoffgruppen in 2050



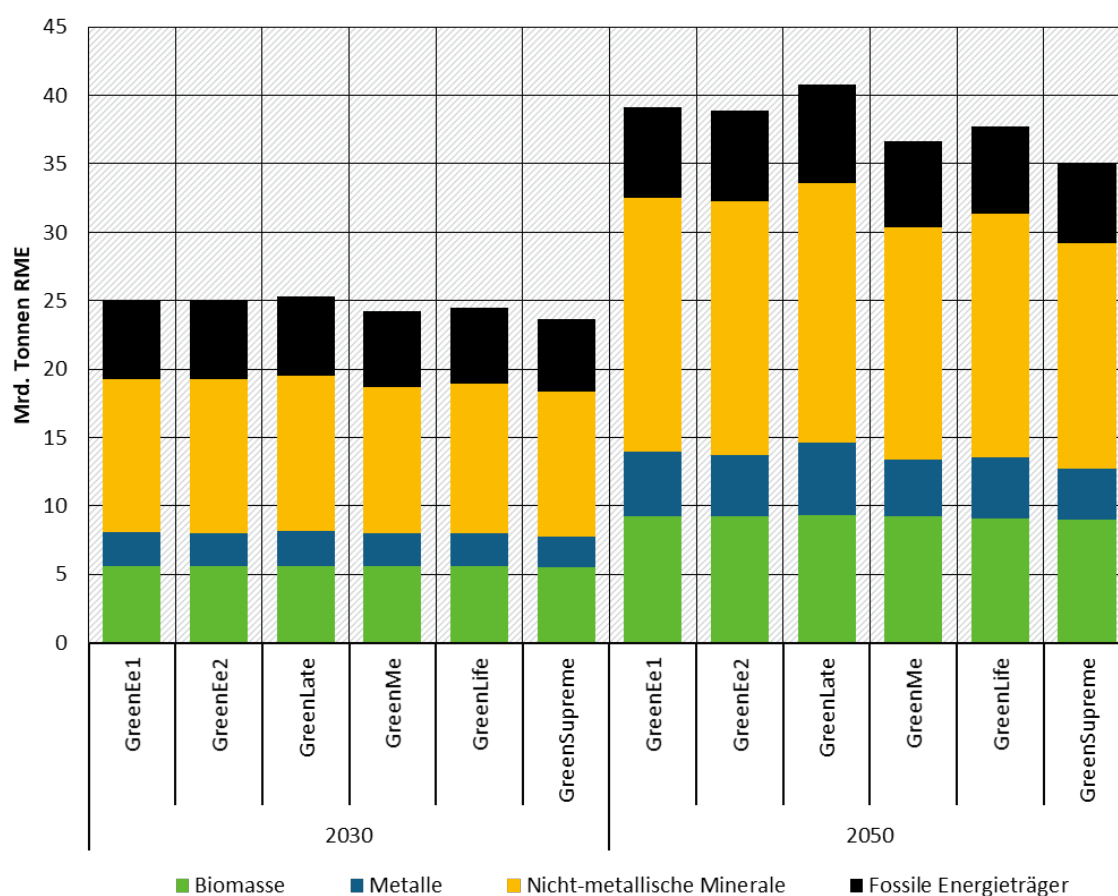
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG – URMOD

3.8 Kumulierte Rohstoffe im Vergleich

Die unterschiedlich hohen Ambitionsniveaus bezüglich der Rohstoffeinsparung zeigt sich im Ergebnis an der Menge Primärrohstoffe, die zwischen 2010 und 2050 von Deutschland (in der Abgrenzung des RMC bzw. der letzten inländischen Verwendung) in Anspruch genommen werden (Abbildung 23).

Bereits in der bis 2030 kumulierten Rohstoffmenge zeigen sich Unterschiede zwischen den Szenarien, die bis 2050 noch deutlicher sichtbar werden: die kumulierte Menge der in Anspruch genommenen Primärrohstoffe ist in GreenSupreme, gefolgt von GreenMe, am geringsten und in GreenLate am höchsten. Der Unterschied zwischen GreenLate und GreenSupreme beträgt bis 2050 insgesamt 5,7 Mrd. Tonnen Rohstoffäquivalente, davon 2,5 Mrd. Tonnen nicht-metallische Minerale und 1,6 Mrd. Tonnen Metallerze.

Abbildung 23: Zwischen 2010 und 2030 bzw. 2050 kumulierter Primärrohstoffkonsum



Quelle: eigene Darstellung einer Berechnung auf Basis von ifeu/IEE/SSG – URMOD

3.9 Die Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich

3.9.1 Holz

Die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach Holz ist in allen Green-Szenarien rückläufig, unter anderem weil Primärholz ab 2030 annahmegemäß nicht mehr energetisch eingesetzt wird. Im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien liegt die Nachfrage nach Holz in GreenLate, GreenMe und GreenSupreme höher und nur in GreenLife niedriger (Tabelle 13).

Die höhere Nachfrage in GreenLate ist im Wesentlichen auf die geringere Effizienzsteigerung im Vergleich zu beiden GreenEe-Szenarien zurückzuführen. In GreenMe und GreenSupreme steigt die effiziente Nutzung von Holz und Holzprodukten im Inland und Ausland einschließlich einer höheren Nutzung von Altholz. Gleichzeitig wird Holz vermehrt im Hoch- und Tiefbau eingesetzt und substituiert Stahl, Beton und andere Baumaterialien. In GreenLife sinkt die Nachfrage aufgrund der stärkeren Nachfrage nach langlebigeren und reparierbaren Gegenständen, darunter Möbel, und aufgrund effizienterer Wohnformen, darunter ein höherer Anteil Mehrfamilienhäuser im Vergleich zu ressourcenintensiveren Ein- und Zweifamilienhäusern. In GreenSupreme werden die geringere Nachfrage aus GreenLife und die hohen Substitutionsraten und Effizienzsteigerungen kombiniert.

Tabelle 13: Nachfrage nach Primärholz in 2030, 2040 und 2050

Mio. t RME	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2030	17,9	17,9	18,5	24,6	16,6	20,4
2040	14,8	14,8	15,8	20,3	13,6	15,7
2050	13,3	13,3	14,7	16,6	12,1	12,1

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

3.9.2 Sand, Kies und Schotter

Der Einsatz von Sand, Kies und Schotter ist in allen Green-Szenarien rückläufig aufgrund der nachlassenden Bautätigkeit im Hoch- und Tiefbau in Folge der sinkenden Bevölkerungsanzahl und rückläufigen Siedlungsentwicklung. Niedrigere Recyclingraten und Effizienzsteigerungen bewirken eine höhere Nachfrage in GreenLate im Vergleich zu allen anderen Green-Szenarien (Tabelle 14). Höhere Recyclingraten und Effizienzsteigerungen, Substitutionen insbesondere von Beton und neue effiziente Betone führen zu einem stärkeren Nachfragerückgang in GreenMe und GreenSupreme. Der Unterschied zwischen der am wenigsten und am meisten ambitionierten Transformation in GreenLate und GreenSupreme summiert sich in 2050 auf 75 Mio. Tonnen, gerechnet in Rohmaterialäquivalente.

Tabelle 14: Nachfrage nach Sand, Kies und Schotter in 2030, 2040 und 2050

Mio. t RME	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
2030	361,5	360,8	379,2	314,0	334,6	299,4
2040	298,8	297,6	311,1	249,1	274,6	230,1
2050	229,1	228,6	244,6	174,9	220,3	169,8

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

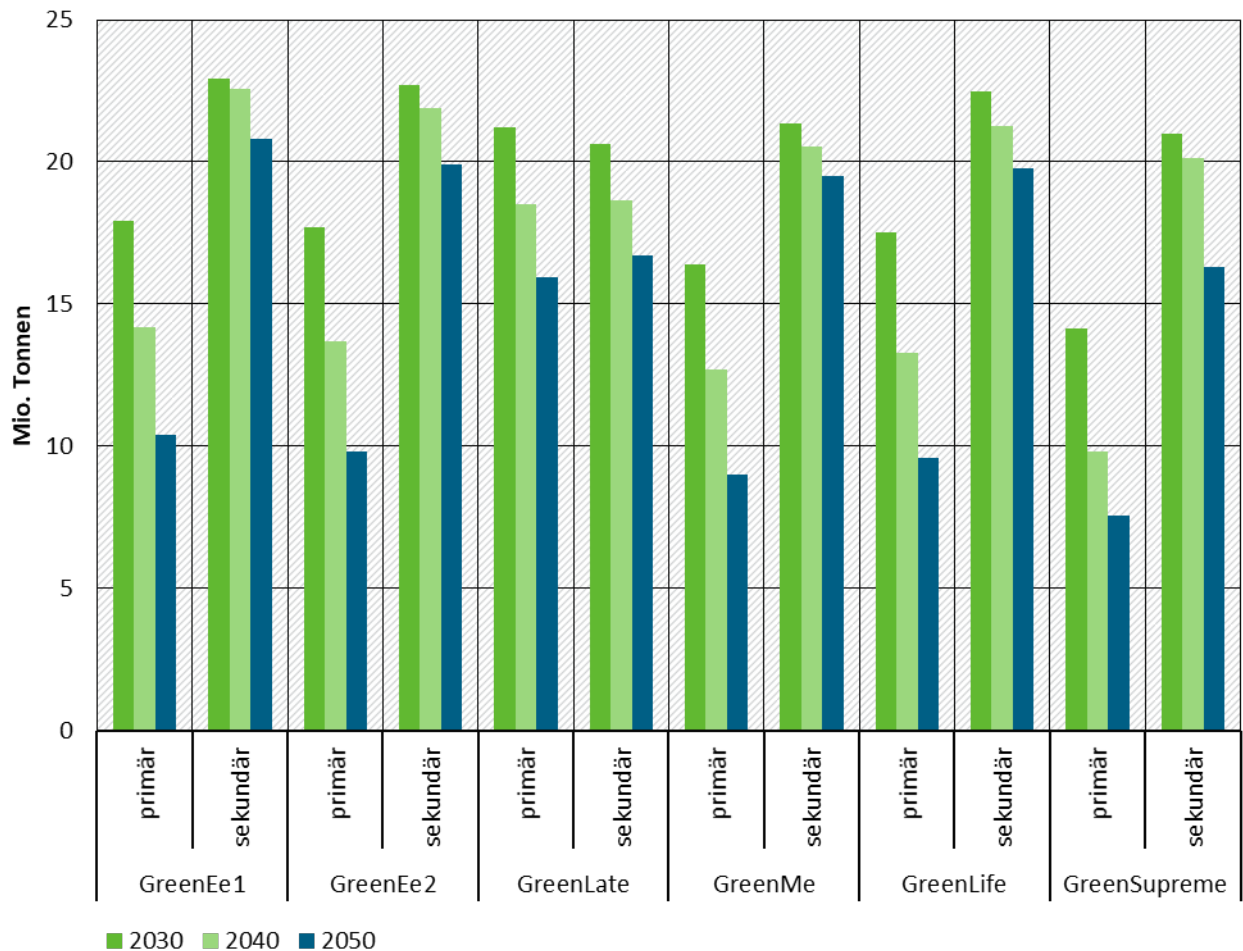
3.9.3 Eisen

Die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach Primäreisen ist in allen Green-Szenarien rückläufig. Die geringsten Rückgänge sind in GreenLate zu verzeichnen; wichtige Gründe sind die geringen Steigerungen des Schrotteinsatzes und geringe Effizienzfortschritte (Abbildung 24). Die höchsten Rückgänge sind in GreenMe und vor allem in GreenSupreme aufgrund der zusätzlich starken Nachfragerückgänge zu finden. In beiden Szenarien ist die Transformation im Rest der Welt schneller und Eisen wird zu höheren Anteilen durch biotische Rohstoffe und auch durch leichtere Metalle (Aluminium) substituiert.

Die Nachfrage nach Eisenschrotten sinkt langsamer als die Nachfrage nach Primäreisen. Sie sinkt in GreenLate am schnellsten, weil - entsprechend den getroffenen Annahmen - Schrotte zu einem geringeren Anteil bei der Stahlproduktion eingesetzt werden. In 2050 ist die Nachfrage in

GreenLate und GreenSupreme etwa gleich, aber aus unterschiedlichen Gründen. So ist in GreenSupreme die anteilige Schrottmenge in der Stahlproduktion sehr hoch, aber die Nachfrage nach Stahl und Eisenprodukten sinkt aufgrund der bereits beim Primäreisen erläuterten Gründe (Effizienzsteigerungen, Technologische Entwicklung im Rest der Welt, Substitution durch andere, v.a. biotische Rohstoffe, etc.).

Abbildung 24: Nachfrage (LIV) nach Primäreisen und Eisenschrotten in 2030, 2040 und 2050



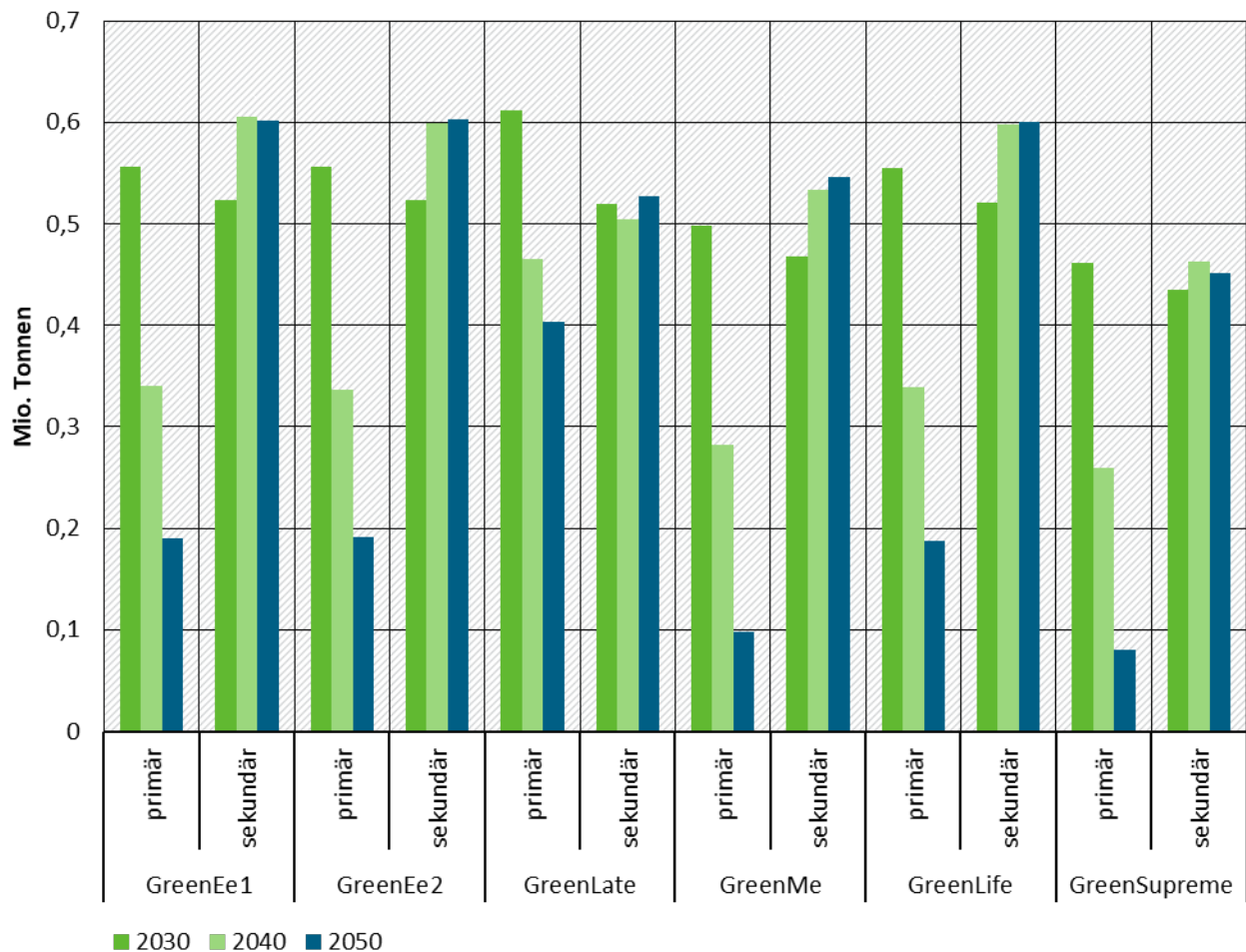
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

3.9.4 Kupfer

Die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach Primärkupfer ist ebenso wie die nach Primäreisen in allen Green-Szenarien rückläufig. Der geringste Rückgang ist wieder in GreenLate zu sehen (Abbildung 25); die wesentlichen Gründe sind erneut der geringere Schrotteinsatz und die geringeren Effizienzsteigerungen. Auf der anderen Seite sinkt die Nachfrage nach Primärkupfer in GreenSupreme am schnellsten. GreenSupreme kombiniert hohe Effizienzsteigerungen im In- und Ausland, Substitutionseffekte und rohstoffsparende Technologien aus GreenMe mit einem Rückgang der Nachfrage nach verschiedenen kupferhaltigen Produkten.

Die Nachfrage nach Kupferschrotten ist in GreenSupreme, gefolgt von GreenLate am geringsten. Erneut sind die Gründe unterschiedlich: während in GreenLate der niedrigere Schrottanteil Ursache ist, sind die Gründe bei GreenSupreme identisch zu den Rückgängen der Nachfrage nach Primärkupfer.

Abbildung 25: Nachfrage (LIV) nach Primärkupfer und Kupferschrotten in 2030, 2040 und 2050



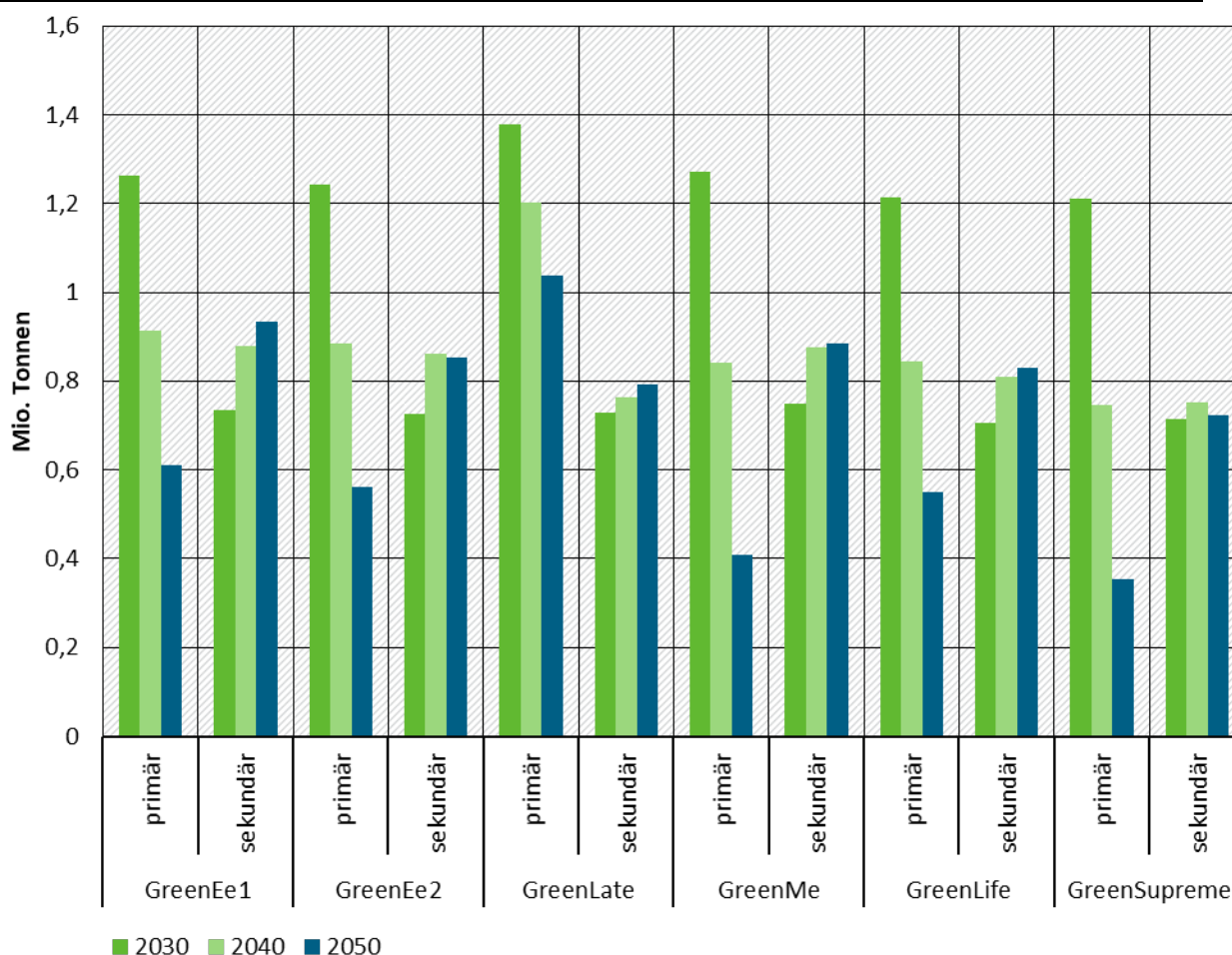
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

3.9.5 Aluminium

Die gesamtwirtschaftliche Nachfrage (LIV) nach Primäraluminium sinkt in allen Green-Szenarien. Wie bei den Rohstoffen Eisen und Kupfer sinkt die Nachfrage am schnellsten in GreenSupreme, gefolgt von GreenMe, und am langsamsten in GreenLate (Abbildung 26).

Die Nachfrage nach Sekundäraluminium ist in GreenLate und GreenSupreme etwa gleich hoch, wobei die Nachfrage in GreenLate steigt und in GreenSupreme fällt. Wichtige Gründe sind in GreenLate der geringe Aluminiumschrottanteil und in GreenSupreme unter anderem hohe Effizienzanstrengungen im In- und Ausland und die geringere Nachfrage nach Aluminiumprodukten. In GreenMe liegt die Nachfrage etwa so hoch wie in GreenEe1. In GreenMe gleichen sich erhöhte Effizienzanstiege und Substitutionseffekte (Aluminium substituiert Kupfer und Stahl in verschiedenen Anwendungen) weitgehend aus.

Abbildung 26: Nachfrage nach Aluminium, primär und sekundär, in 2030, 2040 und 2050



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

3.9.6 Ausgewählte Technologiemetalle

Die folgenden Tabellen zeigen die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach ausgewählten Technologiemetallen. Bei den meisten der untersuchten Metalle ist die Nachfrage in allen Green-Szenarien rückläufig, am stärksten in GreenSupreme und am geringsten in GreenLate. Eine Ausnahme ist Blei, das in Seekabeln der offshore-Windkraftparks zum Einsatz kommt. Die Nachfrage nach Blei steigt in GreenLate durch den verzögerten Aufbau der offshore-Anlagen in 2030. Bemerkenswert ist auch die deutlich geringere Nachfrage nach Silber in GreenMe und GreenSupreme. In beiden Szenarien werden ressourcenschonende PV-Technologien eingesetzt, dies führt unter anderem zur geringeren Nachfrage.

Es sei darauf verwiesen, dass die Methodik der Input-Output-Modelle bei Rohstoffen, die eine vielseitige und disperse Verwendungsstruktur in der Volkswirtschaft haben, an ihre Grenzen stößt. Kleine Nachfrageänderungen können sich stark auf das Ergebnis auswirken. Auch die Annahmen zu den Technologieänderungen im Rest der Welt wirken sich auf die Importe (Vor- und Endprodukte) aus. Daher sollten insbesondere kleine Unterschiede zwischen den Szenarien nicht überbewertet und überinterpretiert werden.

Tabelle 15: Nachfrage (LIV) nach ausgewählten Metallen (1) in Tsd. Tonnen

Tsd. t	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
--------	----------	----------	-----------	---------	-----------	--------------

Tsd. t	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Zink						
2030	360,4	351,6	391,0	333,1	351,8	305,5
2040	256,7	241,7	343,6	220,7	240,9	185,7
2050	136,1	123,8	276,2	83,2	124,1	69,5
Blei						
2030	146,5	143,1	112,7	100,4	142,7	96,0
2040	95,9	91,5	156,7	55,9	91,1	61,1
2050	40,4	36,8	109,5	16,2	34,9	14,3
Nickel						
2030	41,1	41,0	44,1	37,4	41,1	33,4
2040	31,6	31,7	36,5	27,3	31,2	22,9
2050	23,5	23,4	30,6	17,2	23,3	13,5
Magnesium						
2030	15,1	13,5	15,6	13,8	13,4	12,6
2040	15,4	12,4	15,9	11,7	12,5	9,7
2050	15,0	11,0	15,7	9,4	11,1	7,4
Chrom						
2030	74,0	72,8	76,9	73,5	72,5	67,0
2040	64,7	62,3	68,5	57,7	61,3	55,0
2050	55,2	51,9	61,0	51,1	56,3	41,8

Quelle: eigene Ergebnisse ifeu/IEE/SSG – URMOD

Tabelle 16: Nachfrage (LIV) nach ausgewählten Metallen (2) in Tonnen

Tonnen	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Silber						
2030	312	312	298	271	307	236
2040	283	285	270	225	279	185
2050	219	220	244	171	216	133
PGM						
2030	25	25	26	24	25	20
2040	22	22	23	21	22	16
2050	19	20	21	17	19	12

Quelle: eigene Ergebnisse ifeu/IEE/SSG - URMOD

In der folgenden Tabelle ist die Nachfrage nach Siliziummetall, Lithium, Kobalt und Graphit, der sich aus den PV-Anlagen und Batterien der Kfz, Lkw und LNFZ ergibt, im Szenarien-Vergleich aufgeführt. Die Mengen berücksichtigen keine Sekundäranteile, und ebenso wenig eine mögliche Nachfrage aus anderen Sektoren bzw. für andere Produkte.

Die nachgefragten Mengen Siliziummetall spiegeln in GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife die in den Jahren gebauten PV-Anlagen wider (neue PV-Anlagen und PV-Anlagen, die alte Anlagen ersetzen). In GreenMe und GreenSupreme sind zudem ressourcenschonende Technologien unterstellt worden, so dass die Mengen im Szenario-Vergleich deutlich geringer sind.

Die nachgefragten Mengen Lithium, Kobalt und Graphit resultiert einerseits aus den neuen Fahrzeugen und andererseits aus der unterstellten Batterietechnologie. Da in 2050 in allen

Szenarien neue Lithium-Schwefel-Batterien unterstellt sind, liegt die Nachfrage nach Kobalt und Graphit bei null.

Tabelle 17: Nachfrage nach ausgewählten Metallen (3) in Schlüsseltechnologien in Tonnen

Tonnen	GreenEe1	GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Siliziummetall*						
2030	100.981	87.485	52.624	17.758	85.668	25.704
2040	118.390	113.958	168.709	23.073	109.078	19.611
2050	97.272	94.751	122.341	18.289	91.975	16.639
Lithium**						
2030	2.475	2.475	1.359	2.233	2.507	2.267
2040	21.353	21.353	20.343	18.300	14.484	12.614
2050	18.529	18.529	26.170	16.431	10.510	9.611
Kobalt**						
2030	7.087	7.087	3.893	6.394	7.180	6.493
2040	7.287	7.287	6.942	6.245	4.943	4.304
2050	0	0	0	0	0	0
Graphit**						
2030	38.726	38.726	21.271	34.939	39.231	35.477
2040	39.816	39.816	37.933	34.122	27.007	23.520
2050	0	0	0	0	0	0

Quelle: *eigene Berechnungen, ifeu, **eigene Berechnungen ifeu – TREMOD Materials

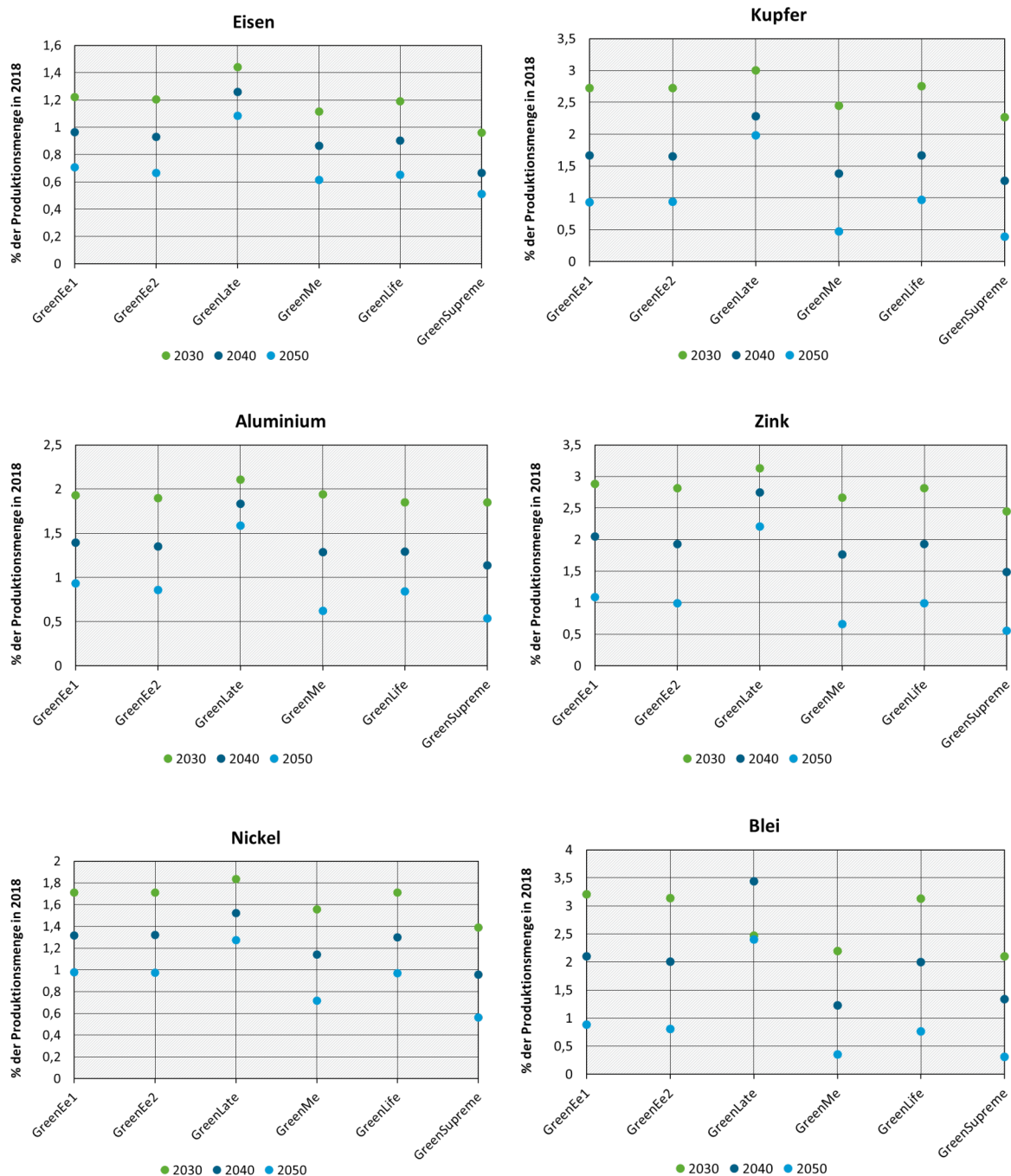
3.10 Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion

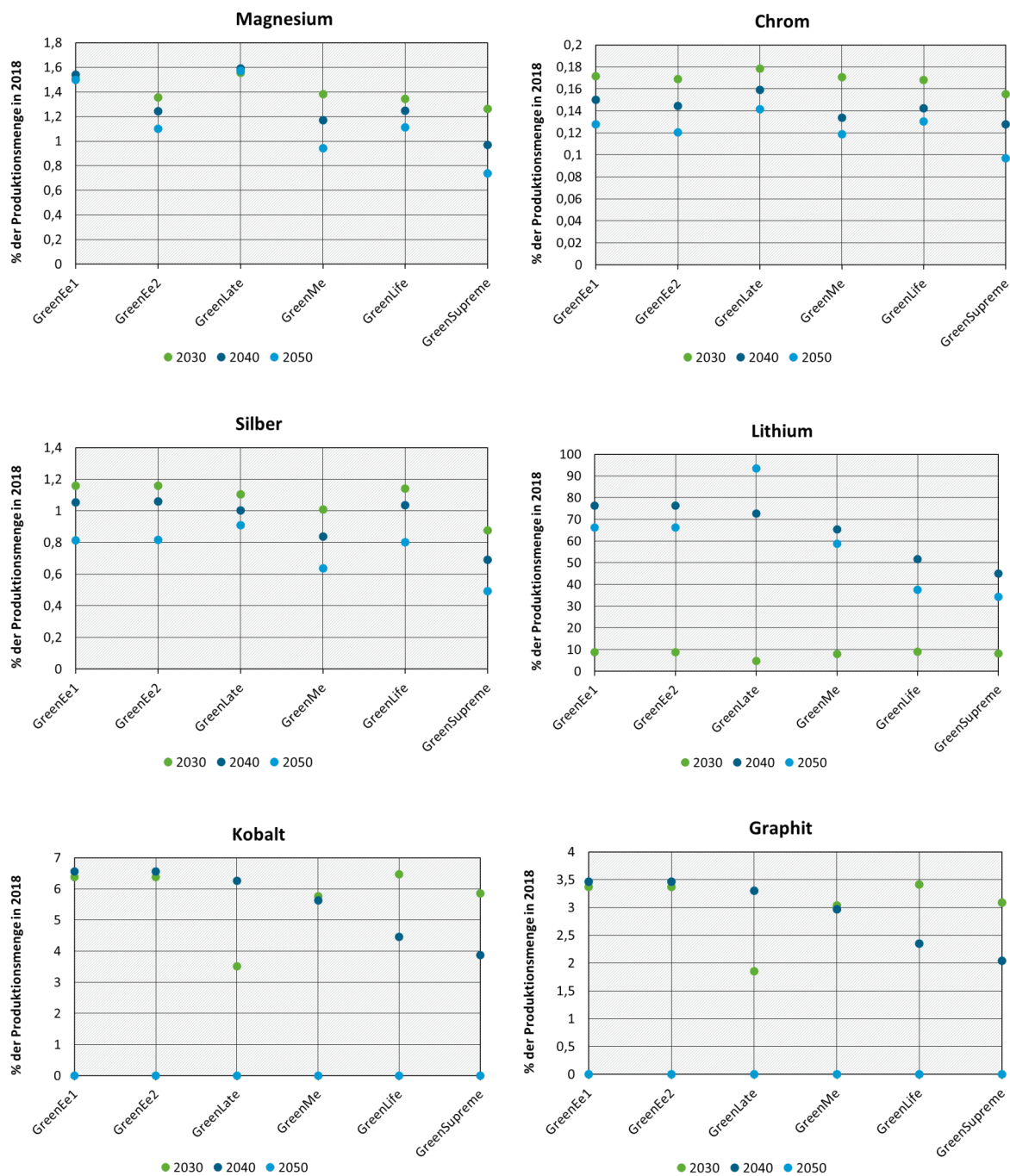
Im Folgenden werden die nachgefragten Mengen ausgewählter Rohstoffe (in der Abgrenzung des RMC bzw. der LIV) im Vergleich zur globalen Produktionsmenge 2018 dargestellt. Folgende Beobachtungen sind relevant:

- Wie im vorigen Kapitel bereits dargestellt, sinkt für die meisten untersuchten Metalle die Nachfrage und liegt in GreenSupreme, gefolgt von GreenMe, am niedrigsten und in GreenLate am höchsten. Ausnahmen gehen auf unterschiedliche Geschwindigkeiten der Einführung und Marktdurchdringung von neuen Technologien einher. Dies zeigt sich auch in den untenstehenden Abbildungen.
- Die Nachfrage gemessen als Anteil an der aktuellen Produktionsmenge sinkt bis 2050 für viele Metalle auf Werte um bzw. unter 1%. Zum Vergleich: in 2010 stellt Deutschland rund 1,1% der Weltbevölkerung, in 2050 wird der Anteil nach UN-Prognosen etwas geringer sein. Nachgefragte Mengen um oder unter 1% entsprechen dem Anteil der Bevölkerung und können als „fairer Anteil“ interpretiert werden. Werte darüber zeigen ein Übermaß, bzw. sie geben Hinweise, für welche Metalle Substitute gesucht bzw. Produktionsmengen gesteigert werden müssten, um die Nachfrage der (in den Szenarien unterstellten) globalen Transformation zu befriedigen.
- Besonders stark ausgeprägt ist das Übermaß der Nachfrage nach Lithium. Die deutsche Nachfrage umfasst in 2040 bzw. 2050, wenn Elektrofahrzeuge die gängige Technologie in den Green-Szenarien sind, zwischen 45 bis 95 % der Produktion in 2018. In den Green-

Szenarien wurde zwar unterstellt, dass Autobatterien ein zweites Leben als Kurzzeitspeicher haben, aber die erforderliche Menge ist in allen Szenarien nur ein Bruchteil der theoretisch zur Verfügung stehenden Altakkus. Recyclingmengen sind bei der Rechnung nicht berücksichtigt, sie könnten die Nachfrage nach Lithium deutlich senken.

Abbildung 27: Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen (LIV) im Vergleich zur Produktionsmenge 2018





Quelle: eigene Darstellung eigene Ergebnisse auf der Basis von ifeu/IEE/SSG – URMOD bzw. TREMOD Materials und USGS, 2020

4 Zusammenfassung

Im RESCUE-Projekt wurden insgesamt sechs Szenarien untersucht, die unterschiedlich ambitionierte Transformationswege zu einer (weitgehenden) Treibhausgasneutralität aufzeigen.

Dieser Bericht ist ein Vergleich der zentralen Ergebnisse, der Treibhausgasemissionen und der Rohstoffinanspruchnahmen. Die größten Unterschiede finden sich über nahezu alle Vergleichsparameter zwischen dem am wenigsten ambitionierten Transformationspfad in GreenLate auf der einen Seite und dem ambitioniertesten Transformationspfad in GreenSupreme auf der anderen Seite. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede zwischen den (im Vergleich zu GreenEe1 & 2) zusätzlichen Ressourceneffizienzanstrengungen in GreenMe und den zusätzlichen Lebensstiländerungen in GreenLife gering, wenn auch im Detail vorhanden.

Die jährlichen Treibhausgasemissionen unterscheiden sich im Jahr 2030 stark im Szenariovergleich. So werden in GreenLate noch immer 586 Mio. Tonnen CO_{2Äq} emittiert – was einem Rückgang von 61,3 % gegenüber 1990 entspricht. Im Gegensatz dazu liegen die THG-Emissionen in GreenSupreme nur noch bei 388 Mio. Tonnen CO_{2Äq}, ein Rückgang von rund 70 %. Die wesentlichen Unterschiede gehen auf die energiebedingten THG-Emissionen einschl. der Emissionen aus dem Transportsektor zurück. Der zügige Ausstieg aus der Kohleverstromung, der flotte Ausbau der erneuerbaren Energien und die schnelle Einführung von Elektromobilität, in GreenSupreme führen im Vergleich zu verzögerten Umstellungen in GreenLate zu insgesamt 172 Mio. Tonnen CO_{2Äq} energiebedingten THG-Emissionen. In 2050 sind die Unterschiede zwischen den Szenarien geringer, aber vorhanden. So liegt die Differenz zwischen GreenLate und GreenSupreme noch immer bei 20,6 Mio. Tonnen CO_{2Äq}.

Die Unterschiede zwischen GreenMe, dem Szenario mit einem sehr ambitionierten technologisch-ressourceneffizienten Wandel, und GreenLife, dem Szenario mit sehr ambitionierten Umstellungen im Lebensstil, zeigen sich vor allem bei den Prozessemissionen aus der Industrie und den THG-Emissionen der Landwirtschaft. Mit sehr ambitionierten ressourceneffizienten Ansätzen können insbesondere prozessbedingte THG-Emissionen aus der Industrie gemindert werden, indem z.B. emissionsintensive Vorprodukte (wie z.B. Zement) gezielt substituiert (z.B. über Holzbaustoffe) oder die Nachfrage (z.B. über neue Betone) insgesamt verringert wird. Die angenommenen zusätzlichen Lebensstiländerungen in GreenLife zeigen den größten Effekt auf die THG-Emissionen aus der Landwirtschaft, besonders wirksam sind die Annahmen zur weiteren Reduktion von Fleisch und Milch bzw. Milchprodukten.

Werden die Treibhausgasemissionen aus der Konsumsicht bilanziert, das heißt, werden Treibhausgasemissionen der Im- und Exporte verrechnet, zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Bilanzierung der territorialen THG-Emissionen. Bei dieser Bilanzierung sind die Annahmen zur Transformationsgeschwindigkeit im Rest der Welt relevant. So verbleiben in den GreenEe-Szenarien, GreenLate und GreenLife energiebedingte THG-Emissionen auch in 2050, die im Ausland entstehen für die Produktion von Gütern, die im Inland konsumiert werden. Diese entfallen vollständig in GreenMe und GreenSupreme, wodurch die THG-Emissionen in 2050 in beiden Szenarien niedriger liegen. Die Differenz zwischen dem am wenigsten ambitionierten Transformationspfad GreenLate und dem ambitioniertesten Transformationspfad ist erheblich und beträgt in 2030 – 2040 – 2050 beträgt 173,1 – 203,5 – 29,2 Mio. Tonnen CO_{2Äq}. Da in keinem der Green-Szenarien eine Verlagerung von treibhausgasintensiven Industrien angenommen wurde, ist der Unterschied zwischen den Szenarien aus der konsumperspektive in einer ähnlichen Größenordnung wie der Unterschied bei der Bilanzierung nach NIR.

Auch die Inanspruchnahme von Primär- und Sekundärrohstoffen (in der Abgrenzung des RMC bzw. der LIV) geht in allen Green-Szenarien zurück. Die Rückgänge sind natürlich geringer als bei den THG-Emissionen. Auch bei den Rohstoffen zeigt sich, dass die geringsten Rückgänge bei fast allen untersuchten Parametern bei GreenLate zu finden sind und die höchsten Rückgänge bei GreenSupreme. Im Gegensatz zu den THG-Emissionen gibt es bei der Rohstoffinanspruchnahme einen klareren Unterschied zwischen GreenMe und GreenLife.

Bis 2050 kann die Primärrohstoffinanspruchnahme um 70 % im ambitioniertesten Szenario GreenSupreme gesenkt werden, hingegen nur um 56 % in GreenLate. Die Unterschiede sind vor allem bei der Nachfrage nach abiotischen Rohstoffen (Metalle, nicht-metallische Minerale, fossile Energieträger) zu finden. Dies geht auf unterschiedlich Recyclinganstrengungen, unterschiedliche Ressourceneffizienzsteigerungen und rohstoffsparende Technologien, unterschiedliche Transformationsgeschwindigkeiten im In- und Ausland und natürlich auf die unterschiedliche gesamtwirtschaftliche Nachfrage zurück.

Der Anstieg der Gesamtrohstoffproduktivität ist in GreenMe am höchsten. In GreenSupreme sinkt zwar der RMI stärker als in GreenMe, allerdings wächst aufgrund der Annahme zur Wachstumsbefreiung das BIP nach 2030 nicht weiter, was insgesamt zu einem etwas niedrigeren Anstieg der Gesamtrohstoffproduktivität in allen Dekaden führt. In Allen Szenarien wächst die Gesamtrohstoffproduktivität stärker als zwischen 2000 und 2010.

In GreenMe ist auch der Anteil der Sekundärrohstoffe an der Gesamtrohstoffnachfrage (primär und sekundär) am höchsten. Der Anteil der untersuchten Sekundärrohstoffe an der Gesamtrohstoffnachfrage liegt in 2050 bei 38 %. Dieser Wert enthält keine Schrotte von Technologiemetallen und stellt somit eine untere Abschätzung dar. Im Gegensatz zu GreenMe liegt der Anteil in GreenLate bei 27 %.

Wird der RMC in 2050 nach Investitionen, privaten Haushalten, Staat und Nicht-Regierungsorganisationen verglichen, so zeigen sich besonders hohe Unterschiede bei den Rohstoffaufwendungen für die Investitionen. Diese sind in GreenSupreme, gefolgt von GreenMe, am niedrigsten und in GreenLate am höchsten. Auffallen sind die höheren Anteile von biotischen Baustoffen in GreenMe und GreenSupreme und die geringeren Anteile von Metallen und nicht-metallischen Mineralen. Der Unterschied der Rohstoffinanspruchnahme der privaten Haushalte ist im Vergleich der Szenarien sichtbar, wenn auch geringer als bei den Investitionen. Die Rohstoffnachfrage des Staates und von NRO ist vergleichsweise gering, so dass sich die Unterschiede zwischen den Green-Szenarien nicht so stark auswirken.

Die Primärrohstoffnachfrage nach Bedürfnisfeldern zeigt im Szenario-Vergleich in allen Bedürfnisfeldern Unterschiede. Besonders groß sind sie im Bedürfnisfeld Wohnen und Haushalt. Der Neubau von Gebäuden wird bei den Investitionen bilanziert, bei den privaten Haushalten werden jedoch Sanierungen und Reparaturen gerechnet. Daher wirken sich die Annahmen zum Bau in diesem Bedürfnisfeld ebenso aus. Auch in den anderen Bedürfnisfeldern zeigen sich Unterschiede. Größere Unterschiede zeigen sich im Bedürfnisfeld Ernährung. Die Rohstoffinanspruchnahme ist überraschens im Szenario GreenSupreme am höchsten; dies wird verständlich, wenn gleichzeitig das Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus mit betrachtet wird, dem Restaurantbesuche zugeordnet sind. Aufgrund der Wachstumsbefreiung wird in GreenSupreme im Vergleich zu anderen Szenarien weniger Einkommen für Auswärtssessen ausgegeben und dafür mehr zu Hause gegessen.

In allen Green-Szenarien sinkt die Nachfrage nach der Mehrzahl der untersuchten Rohstoffe. Wesentliche Ausnahmen sind Technologiemetalle, die für den Aufbau von Schlüsseltechnologien für die Energiewende benötigt werden, darunter Siliziummetalle und Lithium.

Insgesamt sinkt die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach den (Primär-) Basismetallen Eisen, Kupfer und Aluminium in allen Szenarien, am stärksten in GreenSupreme und am geringsten in GreenLate. Aufgrund der geringen Schrottanteile steigt die Nachfrage nach Eisen-, Kupfer- und Aluminiumschrotten in GreenLate weniger als in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife. In GreenSupreme liegt die Nachfrage nach diesen Schrotten etwa gleichauf mit GreenLate.

Wird die Nachfrage mit den aktuellen Produktionsmengen (von 2018) verglichen, so zeigt sich, dass die Nachfrage aus Deutschland bis 2050 insbesondere in GreenSupreme bei der Mehrzahl der untersuchten Metalle auf oder unter rund einem Prozent der Produktionsmenge sinkt. Dies entspricht etwa dem Anteil der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung. Besonders überproportional ist die Nachfrage nach Lithium. Die Nachfrage übersteigt in 2040 bzw. 2050, wenn Elektrofahrzeuge die gängige Technologie in den Green-Szenarien sind, die gegenwärtige Produktion um das 45 bis 95-fache. Trotz der Einsparungen und neuen Technologien in GreenSupreme ist die Nachfrage allein aus Deutschland rund 45mal höher als die gegenwärtige Produktion. Mögliche Recyclingmengen sind bei der Rechnung nicht berücksichtigt, sie könnten die Nachfrage deutlich senken.

Insgesamt zeigt der Szenarienvergleich, dass eine sehr ambitionierte Transformation, wie sie GreenSupreme darstellt, im Vergleich zu einer weniger ambitionierten Transformation wie im GreenLate-Szenario insgesamt 4,8 Mrd. Tonnen CO₂Äq bis 2050 und 5,7 Mrd. Tonnen Primärrohstoffe einsparen kann.

A Quellenverzeichnis

- 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 (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf (28.07.2020).
- Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden. S. 51.
- 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 - GreenLife. UBA Climate Change 04/2020.
- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020b): 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. (2020c): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020.
- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020d): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe. UBA Climate Change 03/2020.
- Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020e): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. UBA Climate Change 05/2020.
- Greenpeace (2018): Wenn Wälder wieder wachsen Eine Waldvision für Klima, Mensch und Natur. https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s02061_greenpeace_studie_waldvision.pdf (28.07.2020).
- Oehmichen, K.; Klatt, S.; Gerber, K.; Polley, H.; Röhling, S.; Dunger, K. (2018): Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutz-präferenz und Trendfortschreibung - Szenari-entwicklung, Ergebnisse und Analyse. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 88 p, Thünen Rep 59.
- UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_dt.pdf (28.07.2020).
- 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 (2020a): Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>.
- UBA (2020b): RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. In: *Umweltbundesamt. Text*, Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-konzepte-fuer-die-klimaschutz/rescue-wege-in-eine-ressourcenschonende>. (28.07.2020).
- UNEP (2016): Global Material Flows and Resource Productivity. Assessment Report for the UNEP International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Paris.
- UNFCCC (2015): Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (28.07.2020).