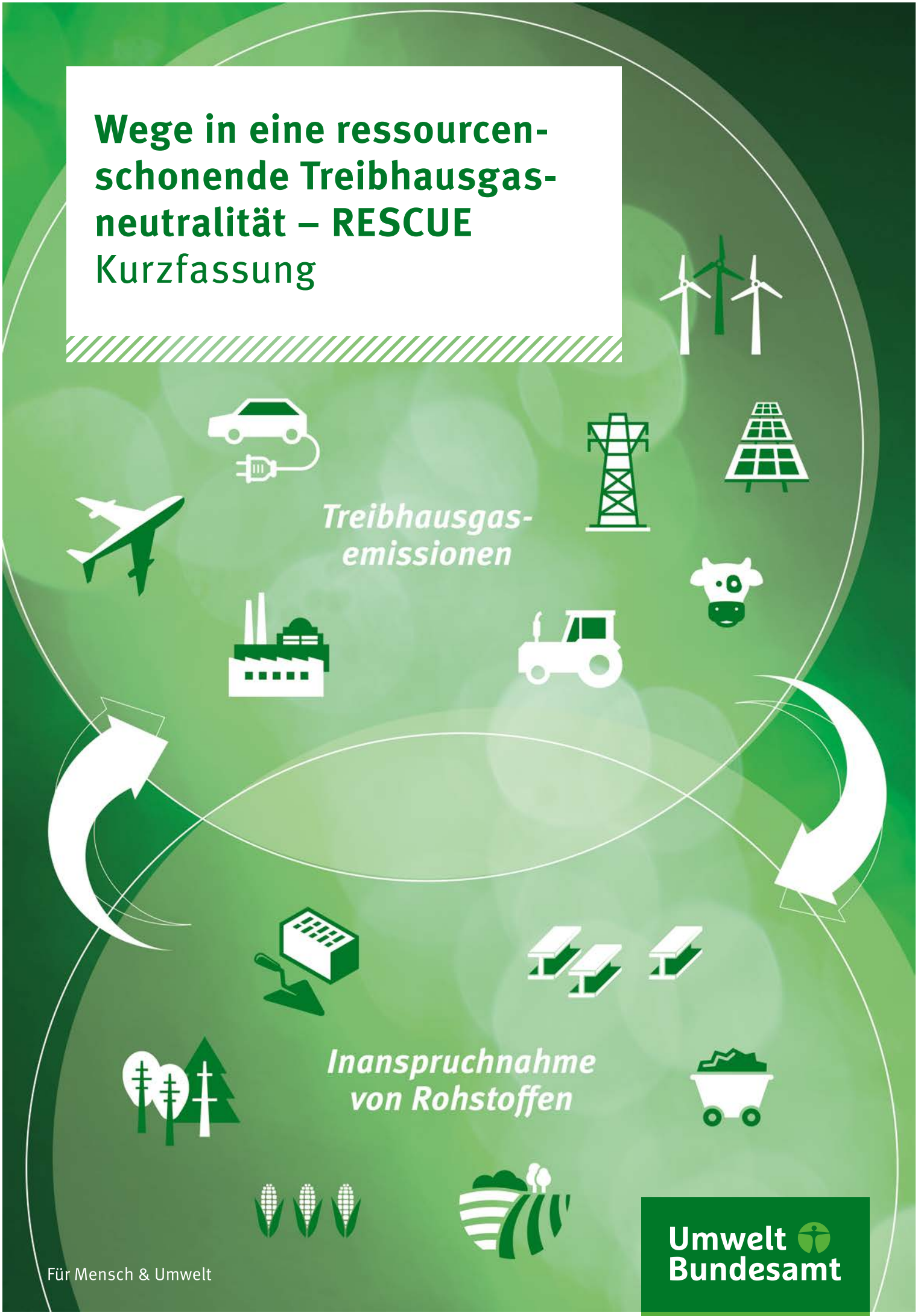
Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE

Kurzfassung



Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

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
/umweltbundesamt
/umweltbundesamt
/umweltbundesamt

Autoren und Autorinnen:
Jens Günther, Harry Lehmann, Philip Nuss und Katja Purr

sowie
Frederike Balzer, Detlef Drosihn, Knut Ehlers, Eric Fee,
Matthias Futterlieb, Dirk Günther, Benno Hain,
Reinhard Herbener, Katja Hofmeier, Guido Knoche,
Matthias Koller, Kora Kristof, Martin Lambrecht, Martin Lange,
Felix Müller, Nathan Obermaier, David Pfeiffer,
Marie-Luise Plappert, Sebastian Plickert, Christopher Proske,
Bettina Rechenberg, Manuel Rudolph, Martin Schmied,
Joscha Steinbrenner, Carla Vollmer, Max Werlein

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

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

Satz und Layout:
publicgarden GmbH, Berlin

Publikationen als pdf:
www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:
shutterstock, Adobe Stock

Stand:
Dessau-Roßlau, November 2019

ISSN 2363-832X

Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE

Kurzfassung

Nachfolgend dargestellte Szenarienergebnisse basieren im Wesentlichen auf Analysen des laufenden Forschungsvorhabens „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“ (FKZ: 3715 41 115 0). Das Vorhaben wird von:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH:
M. Dittrich, F. Dünnebeil, A.v. Oehsen, S. Koeppen,
R. Vogt, H. Fehrenbach, K. Biemann, S. Limberger,
B. Ewers, A. Auberger
Franhofer IEE – Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft:
N. Gerhardt, S. Becker, D. Böttger, F. Frischmuth
SSG – Sustainable Solutions Germany: K. Schoer
sowie CONSIDEO: K. Neumann bearbeitet.

Inhalt

Zusammenfassung ... **7**

Einleitung ... **8**

Die Green-Szenariofamilie ... **14**

Handlungsfelder ... **19**

3.1 Energie ... **21**

3.1.1 Entwicklung der Endenergienachfrage ... 22

3.1.2 Entwicklung der Stromversorgung ... 25

3.1.3 Entwicklung der Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung ... 30

3.1.4 Schlussfolgerungen ... 32

3.2 Bauen und Wohnen ... **34**

3.2.1 Entwicklung der Energiebedarfe und deren Versorgung ... 35

3.2.2 Entwicklung ausgewählter Rohstoffbedarfe ... 39

3.2.3 Schlussfolgerungen ... 40

3.3 Mobilität ... **42**

3.3.1 Entwicklung des Verkehrs ... 43

3.3.2 Schlussfolgerungen ... 48

3.4 Industrie ... **49**

3.4.1 Entwicklung der Industrie ... 51

3.4.2 Schlussfolgerungen ... 54

3.5 Abfall und Abwasser ... **56**

3.6 Landwirtschaft und LULUCF ... **57**

3.6.1 Entwicklung der Landwirtschaft ... 57

3.6.2 Entwicklung der Senken ... 60

3.6.3 Schlussfolgerungen ... 61

Wirkungen ... **63**

4.1 Treibhausgasemissionen ... **64**

4.1.1 2030 – Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität ... 64

4.1.2 2050 – Treibhausgasneutralität ... 66

4.1.3 2050 – Treibhausgasneutralität im globalen Kontext ... 69

4.1.4 Fazit ... 71

4.2 Rohstoffe ... **71**

4.2.1 Entwicklung des Primärrohstoffkonsum ... 72

4.2.2 Zirkularität der deutschen Volkswirtschaft ... 75

4.2.3 Übersicht über ausgewählte Einzelrohstoffe ... 75

4.2.4 Entwicklung der Rohstoffproduktivität bis 2050 ... 77

4.2.5 Fazit ... 78

Kernbotschaften ... **79**

Literatur ... **82**

Zusammenfassung

Die globalen Treibhausgasemissionen steigen trotz wachsender Klimaschutzmaßnahmen weiter an. So lagen 2017 die fossilen CO_2-Emissionen mit 37 Gigatonnen (Gt) rund 63 % über denen von 1990 (EK, 2019b). Auch die globale Rohstoffinanspruchnahme nimmt kontinuierlich zu und betrug in 2017 mit rund 92 Gt das Fünfzehnfache gegenüber 1900 (UNEP, 2019a). Hiermit einhergehend sind bereits vier von neun planetaren Belastungsgrenzen überschritten (zum Klimawandel, zur Unversehrtheit der Biosphäre, zum Landnutzungswandel und zu biogeochemischen Stoffströmen (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015)). Schnelles Handeln ist erforderlich, um zu vermeiden, dass wir an einen Punkt kommen, an dem wir uns unserer natürlichen Grundlagen berauben. Um dem entgegen zu treten, ist eine grundlegende Transformation im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung dringend erforderlich. Dabei sind alle Bereiche des Handelns und Wirtschaftens betroffen.

Vor diesem Handlungsdruck und angesichts der offenkundigen Wechselwirkungen zwischen Klima- und Ressourcenschutz werden in der RESCUE-Studie sechs verschiedene Szenarien zur Beschreibung der Lösungs- und Handlungsspielräume für den Weg in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität in Deutschland betrachtet. Die Szenarien spiegeln insbesondere die Einflüsse unterschiedlicher Anstrengungsniveaus zur Treibhausgasneutralität (GreenLate – langsam, GreenSupreme – schnell), der Materialeffizienz (GreenMe) sowie einer noch stärkeren Verbreitung nachhaltiger Lebensstile (GreenLife) wieder.

In allen Green-Szenarien ist das Gesamtminderungsziel des Klimaschutzplans bis 2030 trotz der Verfehlung einzelner sektoraler Ziele sicher gewährleistet, insbesondere durch eine weitgehende Transformation der Energiewirtschaft. Allen Szenarien gemeinsam ist eine Transformation hin zu einer vollständigen erneuerbaren Energieversorgung bis 2050 (Strom, Brenn-, Kraft- und Rohstoffe). Bis 2050 werden unter Berücksichtigung der auf die Ziele der Bundesregierung anrechenbaren Treibhausgasemissionen Minderungen von 95 % im GreenLate Szenario bis hin zu 97 % im GreenSupreme Szenario erreicht. Durch eine nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung, also natürliche Senken, können die ambitionierten Szenarien GreenLife und GreenSupreme Netto-Null-Emissionen sicher erreichen und selbst das GreenLate Szenario kommt diesem Anspruch nahe. Die Szenarien zeigen damit, dass für Treibhausgasneutralität in Deutschland kein (technisches) Carbon Capture and Storage (CCS) erforderlich ist. Für eine Entwicklung, die sich am Übereinkommen von Paris orientiert, sind die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990, ambitioniert, wie z.B. in GreenSupreme beschrieben, in der Größenordnung von mindestens 70 % zu mindern.

Mit dem Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger in allen Szenarien, geht anteilig die größte Reduktion des Rohstoffbedarfs einher. Der RMC (Raw Material Consumption) kann bis 2050 im Vergleich zu 2010 in GreenLate um 56 % gemindert werden. Durch Energie- und Materialeffizienz, durch die Ausschöpfung des technischen Recyclingpotenzials, durch eine deutlich ausgeprägtere Materialsubstitution, durch den Einsatz innovativer Materialien wie z.B. Textilbeton und durch eine stärkere Verbreitung nachhaltige Lebensstile wird im GreenSupreme Szenario eine Reduktion des RMC um bis zu 70 % erreicht. Jedoch kann es dabei auch zur Mehrinanspruchnahme von einzelnen zentralen Rohstoffen (z.B. Metallen) kommen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der RESCUE-Studie, dass für einen angemessenen Beitrag Deutschlands zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C und eine global gerechten Rohstoffnutzung hohe nationale Anstrengungen in internationaler Kooperation nötig sind, wie z.B. im GreenSupreme-Szenario dargestellt. Dies mag angesichts der aktuellen Trends als sehr ambitioniert erscheinen. Das GreenSupreme-Szenario zeigt aber auch, dass Treibhausgasneutralität in Deutschland und das Erreichen eines nachhaltigen Niveaus der Primärrohstoffinanspruchnahme durchaus möglich sind. Dafür muss allerdings jetzt gehandelt und dafür müssen alle Möglichkeiten sowohl in der Produktion als auch im Konsum, genutzt werden!

1 Einleitung

Hintergrund

Natürliche Ressourcen wie Rohstoffe (Biomasse, Metalle, nichtmetallische Mineralien, fossile Energieträger), Wasser, Land und Ökosysteme bilden die Grundlage unseres täglichen Lebens und Wohlstands. Ihre Nutzung ermöglicht die Versorgung mit Futter- und Nahrungsmitteln sowie Trinkwasser, Wohnraum und Infrastruktur, Verkehr, Kommunikation und ein beinahe unendliches Spektrum an Gütern und Dienstleistungen. Ihre beständig steigende Nutzung hat gravierende Folgen. Schon heute werden vier von neun planetaren Belastungsgrenzen überschritten (zum Klimawandel, zur Unversehrtheit der Biosphäre, zum Landnutzungswandel und zu biogeochemischen Stoffströmen, (Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015)). Innerhalb der vergangenen Jahrzehnte hat eine Kombination aus geänderter Land- und Meeresnutzung, Raubbau und Verschmutzung, Klimawandel und invasive Arten zu einem katastrophalen Verlust der Biodiversität geführt, so dass mehr als eine Million Tier- und Pflanzenarten derzeit vom Aussterben bedroht sind (IPBES, 2019). Rohstoffe sind dabei im Besonderen relevant. Denn der Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen verursacht derzeit rund die Hälfte der weltweiten Treibhausgasemissionen sowie mehr als 90 % des weltweiten Artensterbens und der Wasserknappheit (UNEP, 2019b). Andererseits spielen sie für erneuerbare Energien, nachhaltige Baustoffe und Infrastruktur, moderne Kommunikationssysteme und CO_2-arme Mobilität eine Schlüsselrolle (Mancini et al., 2019).

Angetrieben durch die steigende Weltbevölkerung und die zunehmende Wirtschaftsleistung ist die globale Rohstoffinanspruchnahme von 6 Gt (Gigatonnen) im Jahr 1900 auf mehr als 90 Gt in 2017 gestiegen (UNEP, 2019b). Bis zum Jahr 2050 könnte sich, vor dem Hintergrund einer steigenden Weltbevölkerung, die Nachfrage nach Rohstoffen nochmals verdoppeln, auf dann 160 bis 180 Gt (Hatfield-Dodds et al., 2017; OECD, 2019; UNEP, 2019b). Die nachhaltige Nutzung von Rohstoffen ist somit grundlegend, um die ökologischen und sozio-ökonomischen Ziele innerhalb der Agenda 2030 der Vereinten Nationen zu erreichen.

Trotz einer wachsenden Anzahl von Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels sind die global anthropogen verursachten Treibhausgasemissionen von 1970 bis 2010 von 27 auf 49 Gt $CO_{2Äq}$ gestiegen (IPCC, 2014). In dieser Zeit trugen die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und aus industriellen Prozessen 78 % zu den Gesamttreibhausgasemissionen bei. Dies ist verbunden mit einem Anstieg der weltweiten Jahresmitteltemperatur um 0,85 °C über den Zeitraum von 1880 und 2012 (IPCC, 2014). Die globale Durchschnittstemperatur lag 2018 ungefähr 0,79 °C über dem langjährigen Durchschnittswert des 20. Jahrhunderts und insgesamt 1 °C über vorindustriellen Werten (UBA, 2016d). Das Übereinkommen von Paris wurde im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2015 mit dem Ziel verabschiedet, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg bereits bei 1,5 °C zu stoppen (UNFCCC, 2015). Die weltweiten aktuellen politischen Maßnahmen sind jedoch unzureichend hierfür und dürften zu einer Erwärmung um ca. 3,3 °C gegenüber dem industriellen Niveau führen (Climate Action Tracker, 2019).

Politische Rahmenbedingungen und die Lage in Deutschland

Industriestaaten wie Deutschland tragen eine große, auch historische Verantwortung für den globalen Klima- und Ressourcenschutz. Denn ihr heutiges Wohlstandsniveau wurde zum Großteil durch eine überproportionale Nutzung fossiler Energieträger und Rohstoffe ermöglicht.

Vor dem Hintergrund der globalen Herausforderungen hat die Europäische Kommission (EK) mit dem 6. Umweltaktionsprogramm und seiner Zielsetzung, Umweltbelastung und Wirtschaftswachstum voneinander zu entkoppeln, sowohl den Klimaschutz als auch die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen zu einem zentralen Bestandteil der europäischen Umwelt- und Wirtschaftspolitik gemacht (EP & Rat der Europäischen Union, 2002). In der EU-Wachstumsstrategie „Europa 2020“ skizziert die EK ihre Vision eines ressourcenschonenden Europas und wie die Entwicklung hin zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaft unterstützt werden kann (EK, 2010). Aktuell dient der Aktionsplan zur Kreislaufwirtschaft („Circular Economy“) inklusive Überwachungsrahmen, als Rahmen für die Ressourceneffizienzpolitik der EU (EK, 2019a). Der Energiefahrplan zeigt mögliche Pfade der Dekarbonisierung des Energiesystems bis 2050 (EK, 2011) auf, und im November 2018

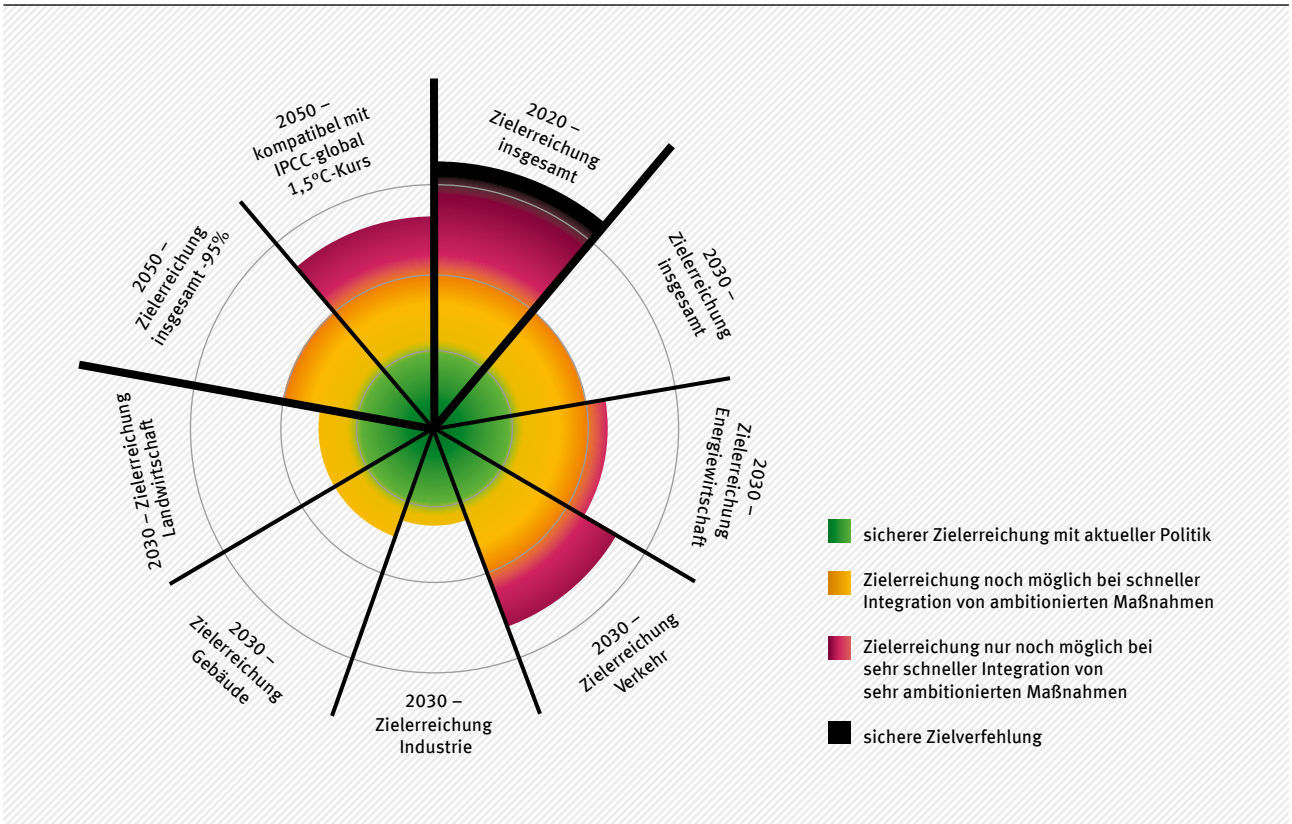
wurde eine langfristige strategische Vision hin zur Klimaneutralität bis 2050 veröffentlicht (EK, 2018). Diese Politiken sind auch Grundlage der deutschen Klima- und Ressourcenpolitik.

Im Hinblick auf die **Klimaschutzziele** hat sich die Bundesregierung dazu verpflichtet, die Treibhausgasemissionen (THG) bis 2050 um 80–95 % gegenüber 1990 zu reduzieren (BMWi, 2010). Insbesondere definiert der Klimaschutzplan 2050 das Etappenziel einer THG-Emissionsminderung von mindestens 55 % bis 2030 gegenüber 1990 und die notwendigen Minderungsbeiträge der einzelnen Sektoren zur Erreichung dieses Zieles (BMU, 2016). Mit den im September 2019 vorgelegten „Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030“ (Bundesregierung, 2019) legt die Bundesregierung „Treibhausgasneutralität“ für Deutschland bis 2050 als neues Umwelthandlungsziel fest.

Der Ausstoß von territorialen Treibhausgasen in Deutschland ist zwischen 1990 und 2017 von 1.251 Millionen Tonnen (Mt) auf 907 Mt zurückgegangen (Rückgang um 28 %). Nach ersten Schätzungen wurden 2018 insgesamt 866 Mt Treibhausgase freigesetzt – also rund 4,5 % weniger als im Vorjahr (UBA, 2019e). Mit Blick auf die relative Entwicklung der THG-Emissionen zeigt sich, dass in der chemischen Industrie der stärkste Rückgang von Emissionen im Zeitraum 1990 bis 2017 erfolgte (80 %). Auch die Emissionen aus Abfall und Abwasser sanken deutlich (73 %) (UBA, 2019a). Einzig im Verkehrssektor wurde eine Zunahme im Vergleich zum Niveau von 1990 verzeichnet (ca. 2 %). Wenngleich derzeit eine Reduktion der THG-Emissionen in nahezu allen Sektoren zu verzeichnen ist, zeigt ein Vergleich des aktuellen Trends mit den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung die Notwendigkeit weiterer Anstrengungen (Abbildung 1).

Abbildung 1

Qualitative Einschätzung zur Erreichbarkeit von Treibhausgasminderungszielen im Kontext des aktuellen Trends

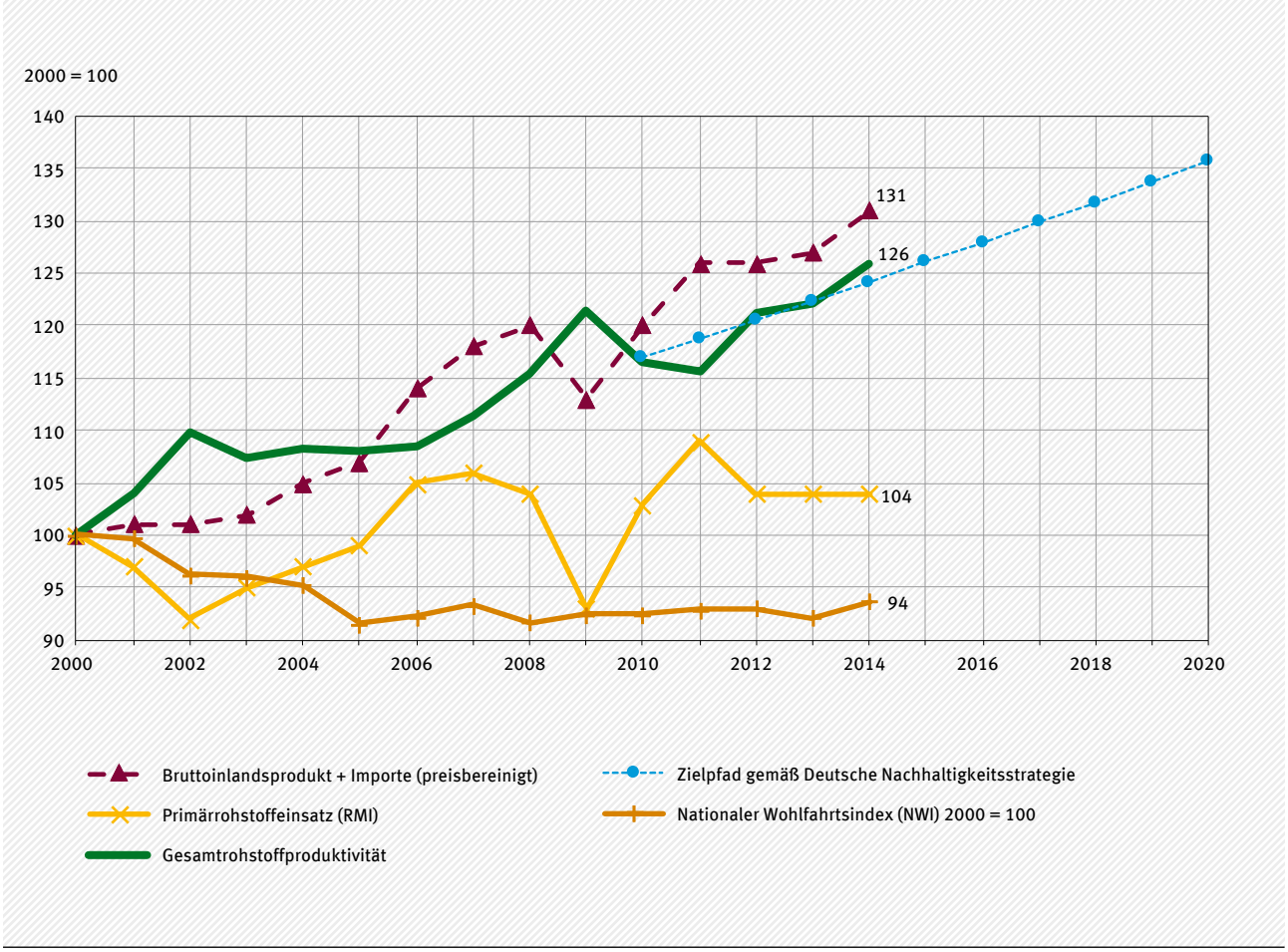


Hinweis: Mit den im September 2019 vorgelegten „Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030“ (Bundesregierung, 2019) der Bundesregierung wird für Deutschland „Treibhausgasneutralität“ bis 2050 als neues Umwelthandlungsziel benannt. Weiter werden Maßnahmen zur Erfüllung der 2030 Ziele beschrieben. Die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

Quelle: Umweltbundesamt

Abbildung 2

Gesamtrohstoffproduktivität, wirtschaftliches Wachstum und nationaler Wohlfahrtsindex * in der Zeit von 2000–2014



* Das BIP in der Berechnung der Gesamtrohstoffproduktivität ist ein Maß für die Wirtschaftsleistung einer Volkswirtschaft. Dieses spiegelt jedoch nicht die gesellschaftliche Wohlfahrt wider. Ergänzend zum BIP ist deshalb auch der Nationale Wohlfahrtsindex (NWI) (UBA, 2019d) abgebildet. Der NWI berücksichtigt insgesamt 20 wohlfahrtsstiftende und wohlfahrtsmindernde Aktivitäten. Er erreichte im Jahr 1999 seinen höchsten Wert und nahm danach bis 2005 ab. Seitdem schwankt er ohne große Änderungen.

Quelle: eigene Darstellung basierend auf UBA, 2018a, 2019d

Hinsichtlich der **nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen** hat Deutschland in seiner Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 bereits das Ziel formuliert, die wirtschaftliche Entwicklung von der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen zu entkoppeln (Bundesregierung, 2002). Mit der Verabschiedung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) im Februar 2012 hat Deutschland als einer der ersten Staaten Ziele, Leitideen und Handlungsansätze zum Schutz der natürlichen Ressourcen festgelegt (BMU, 2012). Zu den Zielen gehören unter anderem: (1) eine möglichst weitgehende Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourceneinsatz sowie die Senkung der damit verbundenen Umweltbelastungen und (2) die Stärkung der Zukunfts- und Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft und dadurch die Förderung von stabiler Beschäftigung und sozialem Zusammenhalt (BMU, 2019c). Mit der ersten Fortschreibung im Jahr 2016 (BMUB, 2016) nimmt ProgRess verstärkt auch die Wechselwirkungen zu anderen Umweltpolitiken in den Blick, insbesondere zum Klimaschutz.

Der Leitindikator der deutschen Ressourcenpolitik, „Gesamtrohstoffproduktivität“[1], misst Deutschlands Fortschritt im sparsamen und effizienten Einsatz von Rohstoffen (Abbildung 2).

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

Die Gesamtrohstoffproduktivität stieg von 2000 bis 2014 um 26 %, hauptsächlich aufgrund des deutlichen Wachstums des Bruttoinlandsproduktes (BIP) und der Importwerte. Die Nutzung von Primärrohstoffen wuchs um 4 % innerhalb desselben Zeitraums und betrug in 2014 2,64 Mrd. t. Davon wurden im Jahr 2014 rund 1,3 Mrd. t für den Konsum und Investitionen in Deutschland verwendet, weitere 1,34 Mrd. t Rohstoff-Äquivalente wurden exportiert. Neben den rund 1,1 Mrd. t in 2014 in Deutschland gewonnener Rohstoffe, wurden zusätzlich 1,54 Mrd. t Rohstoff-Äquivalente in Form von Halb- und Fertigwaren sowie Rohstoffen importiert. Das Ziel der Bundesregierung ist es, die Gesamtrohstoffproduktivität weiter um durchschnittlich 1,5 % pro Jahr von 2010 bis 2030 zu erhöhen. Der durchschnittliche Anstieg um 1,9 % liegt aktuell über diesem Ziel.

Grundidee und Ausblick auf die vorliegende Studie

Eine Transformation hin zu einer nachhaltigen und zukunftsfähigen Gesellschaft, welche sich innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen bewegt, ist in vielfältiger Weise mit der Nutzung natürlicher Ressourcen verbunden. Die vorliegende RESCUE-Studie fokussiert zunächst auf mögliche Transformationspfade zur Erreichung einer rohstoffeffizienten und treibhausgasneutralen Gesellschaft über alle Anwendungsbereiche hinweg.

RESCUE basiert auf der vom Umweltbundesamt veröffentlichten Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA, 2014), die zeigt, dass weitestgehende Treibhausgasneutralität (Reduktion der territorialen Treibhausgasemission um 95 % gegenüber 1990) in Deutschland bis 2050 technisch machbar ist. Eine Schlüsselstellung nimmt hierbei die Transformation zu einem Energiesystem basierend auf 100 Prozent erneuerbarer Energie ein. Durch den vollständigen Umstieg auf erneuerbare Energien und die Ausschöpfung von Effizienzpotenzialen ist es möglich, die Treibhausgasemissionen der Energieversorgung und -nutzung (Strom, Wärme, Verkehr) im Inland[2] auf null zu reduzieren. Zentraler Baustein ist die Sektorkopplung mit der direkten Stromnutzung (z.B. Power to Heat, Elektromobilität) oder indirekten Nutzung mittels Power to Gas (PtG) und Power to Liquid (PtL), so dass treibhausgasneutrale Kraftstoffe für den Verkehr, Grundstoffe für die chemische Industrie und treibhausgasneutrale Brennstoffe für die Prozesswärme in der Industrie bereitgestellt werden können. Allerdings sind für bestimmte Sektoren wie die Landwirtschaft, der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) sowie, nach heutigem Kenntnisstand, auch in Teilen der Industrie die Möglichkeiten zur Treibhausgasminderungen begrenzt, so dass Sockelemissionen auch in diesem ambitionierten Szenario verbleiben. Die THGND2050-Studie stellt jedoch keinen Transformationspfad zu dem aufgezeigten Zielpunkt dar und betrachtet keine Ressourceninanspruchnahmen.

Mit der RESCUE-Studie werden nun in einer systemischen Vorgehensweise **ambitionierter Klima- und Ressourcenschutz** über alle Anwendungsbereiche hinweg gemeinsam betrachtet, um aufzuzeigen, wie Treibhausgasneutralität bei möglichst sparsamer Nutzung von Ressourcen erreicht werden kann. Dies erfolgt mittels sechs Szenarien, die mögliche Entwicklungspfade Deutschlands bis zum Jahr 2050 aufzeigen. Diese umfassen mögliche Entwicklungen in Deutschland z.B. in den Bereichen Energieeffizienz, Materialeffizienz und Produktlebensdauer, Lebensstiländerungen und Wirtschaftswachstum. Ziel ist es aufzuzeigen, (1) wie sich der Rohstoffbedarf (fossile Energieträger, Metalle, nicht-metallische Mineralien und Biomasse) für ein treibhausgasneutrales Deutschland 2050 im Zeitverlauf ändert, (2) welche Auswirkungen einzelne Maßnahmen und Annahmen auf Rohstoffinanspruchnahme und Treibhausgasemissionen haben und (3) welche Wechselwirkungen es zwischen Anstrengungen im Ressourcenschutz und Klimaschutz gibt. Im eingeschränkten Maße werden auch Fragen der Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungen und Verkehr in Deutschland betrachtet. Weitere Aspekte, wie die zeitgerechte Verfügbarkeit von Rohstoffen oder weitere Umweltwirkungen, konnten nur am Rande berücksichtigt werden und sollten Grundlage künftiger Studien sein.

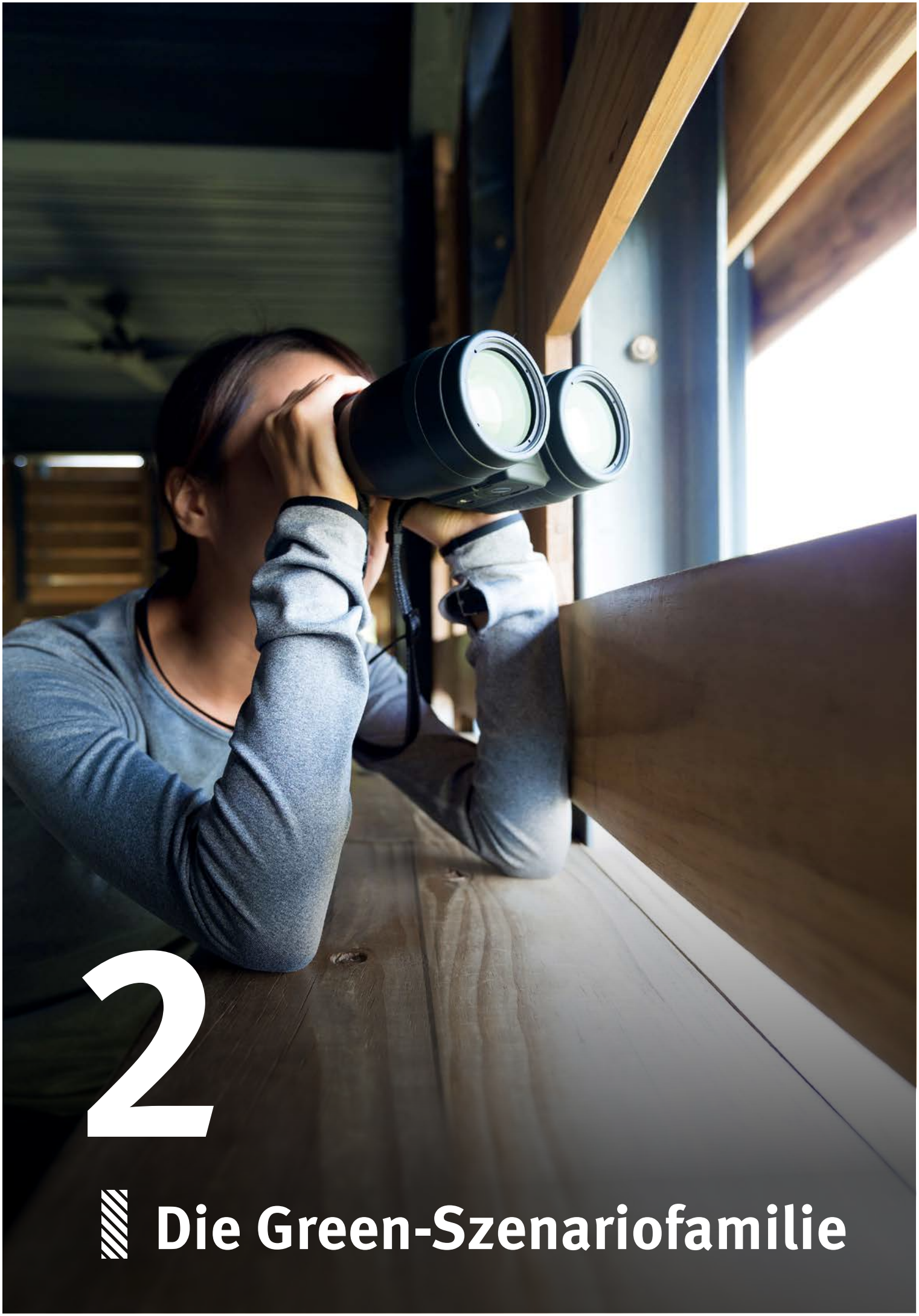
2 In der Studie wurden nur die Treibhausgasemissionen in Deutschland nach dem jährlich erstellten Nationalen Inventarbericht (NIR) sowie die von Deutschland verursachten internationalen Verkehre und LULUCF betrachtet. Nicht betrachtet werden die im Ausland anfallenden Emissionen für importierte Gütern (“Carbon Footprint“) sowie die Emissionen für exportierte Güter.

Methodik

In RESCUE[3] wurde ein Modellverbund aus insgesamt fünf Modellen genutzt, welche mit sektor- und branchenspezifischen Detailanalysen ergänzt wurden, um die Entwicklung der THG-Emissionen und Rohstoffinanspruchnahme im Zeitraum 2010–2050 zu betrachten. Die Modellierung im Verkehrsbereich basieren auf TREMOD (Transport Emission Model, ifeu, 2019b; UBA, 2019c), im Bereich Raumwärme und Kältebedarfe auf GEMOD (Gebäude-Modell, ifeu, 2019a) und im Bereich Landwirtschaft auf ALMOD (Agriculture and LULUCF Model, UBA, 2020a). In Kombination mit den industriellen branchenspezifischen Analysen sowie dem Abfallbereich wurde die Energiemodellierung mit SCOPE (Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des künftigen Energieversorgungssystems) durchgeführt (Fraunhofer IEE, 2016). Die gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung sowie die vorgelagerten Emissionen wurden mit dem umweltökonomischen Rohstoff- und THG-Modell (URMOD) modelliert (ifeu, 2019c). Eine genaue Beschreibung zur Funktionsweise der Modelle ist in „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenEe“ (UBA, 2020a) zu finden.

Es sei darauf hingewiesen, dass ausschließlich eine kostenoptimierte Modellierung der Energiewirtschaft erfolgt. Die Annahmen hierzu sind in „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenEe“ (UBA, 2020a), in „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenLate“ (UBA, 2020b), „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenMe“ (UBA, 2020c), „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenLife“ (UBA, 2020d) und „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenSupreme“ (UBA, 2020e) zu finden. Eine Kostenoptimierung unter Berücksichtigung der volkswirtschaftlichen Kosten, Umwelt- und Gesundheitskosten über alle Emissions- und Rohstoffinanspruchnahmebereiche im Laufe der Transformation erfolgt nicht.

3 Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse basieren im Wesentlichen auf den Arbeit im Rahmen des Forschungsvorhabens „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“ (Forschungskennzahl 3715411150).



2 Die Green-Szenariofamilie

Vor dem Hintergrund der wechselseitigen Abhängigkeiten und der Komplexität beim Klima- und Ressourcenschutz wurden im Rahmen der RESCUE-Studie sechs Szenarien entwickelt, um mögliche Transformationspfade und den Handlungsspielraum hin zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland aufzuzeigen. Diese Green-Szenarien zeigen mögliche Pfade in die Zukunft und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen (territoriale Perspektive) und den Rohstoffverbrauch (Biomasse, fossile Brennstoffe, Metalle und nichtmetallische Mineralien (Konsumperspektive)) auf.

Die Green-Szenarien zeichnen dabei mögliche Transformationspfade Deutschlands – eingebettet in die Europäische Union (EU) und die Welt – als weiterhin produzierenden Industriestandort im globalen Handel mit einer modernen leistungsfähigen Gesellschaft. Die heutigen Strukturen verändern sich nicht fundamental. Innovative Informations- und Telekommunikationstechnologien sind als Ausdruck der zunehmenden Digitalisierung ein fester Bestandteil in Gesellschaft und allen Wirtschaftsbereichen. Die nötigen Infrastrukturen werden zeitnah geplant und umgesetzt, um die Transformation bis 2050 zu ermöglichen.

Klimaschutz, Dekarbonisierung, Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis charakterisieren gesellschaftlichen und industriellen Wandel. Allen Szenerien ist gemein, dass sie Zielszenarien mit einer Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 1990 von mindestens 95 % aufzeigen. Im Transformationspfad wird bis 2030 mindestens das von der Bundesregierung beschlossene Treibhausgasminderungsziel von 55 % gegenüber 1990 erreicht. Wie die Treibhausgasminderung erfolgt, unterscheidet sich in den Szenarien.

Als wesentlicher Einflussparameter wird in allen Szenarien die identische Bevölkerungsentwicklung unterstellt. In alle Green-Szenarien sinkt die Bevölkerung von derzeitig 83 Millionen Menschen auf ungefähr 72 Millionen Menschen im Jahr 2050, entsprechend Variante V1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ der 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung von Destatis (Statistisches Bundesamt, 2015). Entsprechend verändern sich die infrastrukturelle Bedürfnisse und Bauaktivitäten. Letztlich wird unterstellt, dass die Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungen und Verkehr aller Szenarien bis 2050 auf netto Null reduziert wird.

Der Umbau der Energieversorgung erfolgt in allen Szenarien hin zu einem vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden System. In welchem Sektorkopplung, also die direkte oder indirekte Verwendung von regenerativem Strom zur Wärme- (Power to Heat, PtH), Brennstoff-, Kraftstoff- und Rohstoffbereitstellung (Power to Gas, PtG und Power to Liquid, PtL), die vollständige Substitution fossiler Energieträger gewährleistet. Die Energiewende in den Anwendungsbereichen (Verkehr, Industrie, etc.) geht dabei Hand in Hand mit der Energieversorgung. Die Nutzung von Kernenergie wird vor dem Hintergrund des möglichen Schadensausmaßes auf Mensch und Umwelt nicht als Bestandteil einer nachhaltigen Energieversorgung beachtet. Gleichfalls wird in allen Szenarien CCS (Carbon Capture and Storage) nicht berücksichtigt.

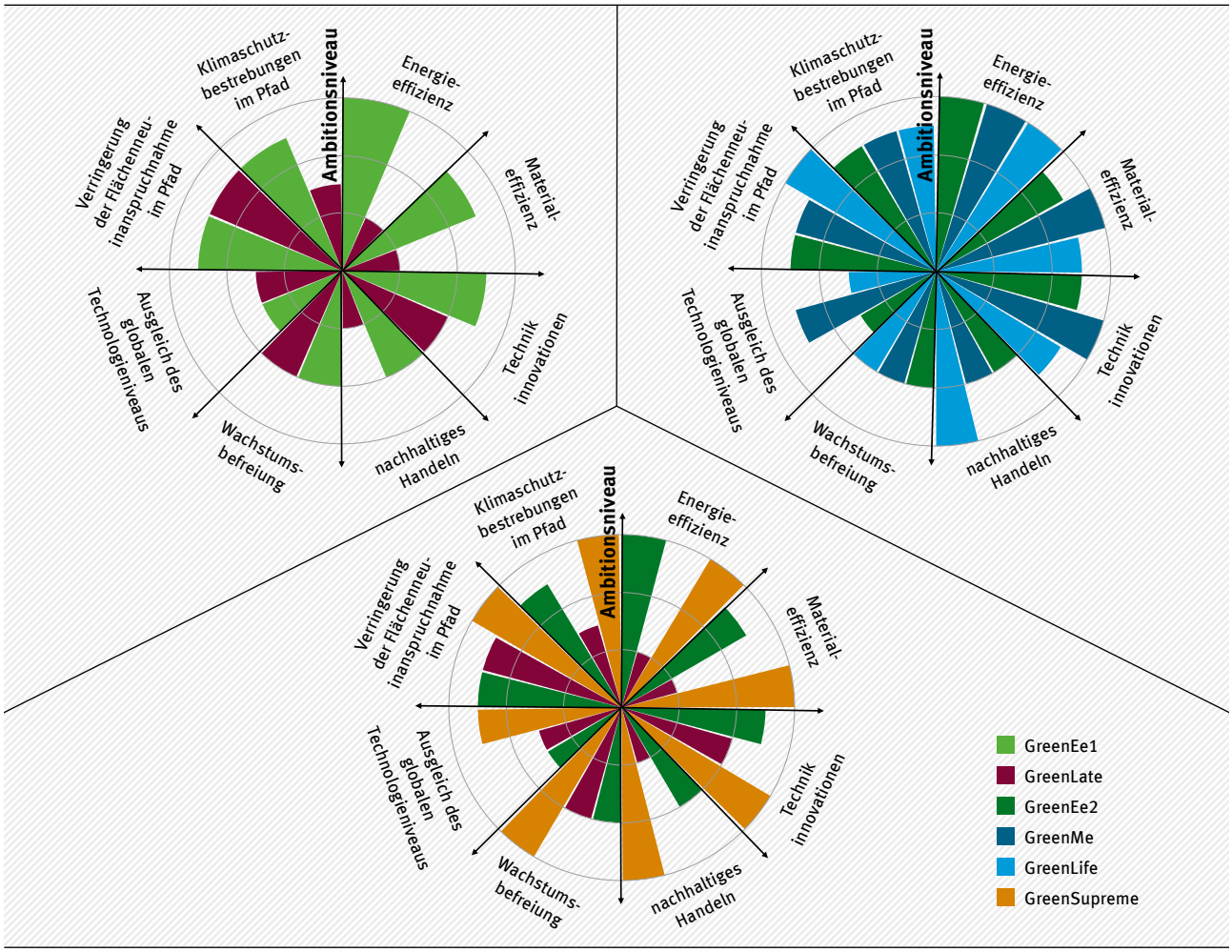
Diese übergreifenden Rahmenbedingungen und Zielsetzungen über alle Szenarien hinweg ermöglichen die Vergleichbarkeit und das Herausarbeiten der Effekte einzelner Einflussparameter auf den Transformationspfad. Die für diese Studie erstellte Green-Szenario-Familie soll insbesondere Einflüsse und Wechselwirkungen unterschiedlicher Anstrengungsniveaus im Laufe des Transformationsprozesses hin zu weitest gehender Treibhausgasneutralität (GreenLate, GreenSupreme), Materialeffizienz (GreenMe) sowie zur stärkeren Verbreitung nachhaltiger Lebensstile (GreenLife) betrachten. Eine kurze Beschreibung der einzelnen Green-Szenarien erfolgt nachfolgend. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Szenarioparameter und wie sie im jeweiligen Szenario unterschieden werden. Ausführlichere Informationen sind in Kapitel 3 der RESCUE-Studie (UBA, 2019f) zu finden.

GreenEe1 und Ee2

Die beiden GreenEe-Szenarien stehen für „Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency“ und fokussieren die Erschließung der Energieeffizienzpotenziale über alle Anwendungsbereiche hinweg. Klimaschutz, Dekarbonisierung, konsequente Energieeinsparung und mehr Ressourcenschutz als gemeinschaftliches Verständnis wird im Laufe dieses gesellschaftlichen und industriellen Wandels immer deutlicher und spiegelt sich in den politisch gesetzten Rahmenbedingungen wieder.

Abbildung 3

Charakteristische Einflussfaktoren der Green-Szenarien



Quelle: Umweltbundesamt

Auch international setzt sich dieses Verständnis – wenn gleich auch langsamer – durch, so dass die Entwicklung globaler Märkte für regenerative Energieträger möglich ist und Carbon Leakage keine ausgeprägte Bedrohung der nationalen industriellen Produktion darstellt. Während beim GreenEe1 die Industrie insgesamt ihre Produktionskapazitäten kontinuierlich steigert und die Exporte weiter ansteigen, erfolgt in GreenEe2 ein ausgeglichenerer globaler Handel, so dass die nationalen Produktionskapazitäten in weiten Bereichen rückläufig sind. Gleichwohl erfolgt u.a. durch steigende Qualität der produzierten Güter und Innovationen weiterhin ein Wirtschaftswachstum. Das Wirtschaftswachstum wird mit 0,7 % in beiden Szenarien als moderat angenommen.

Die Energieversorgung beruht im Jahr 2050 vollständig auf erneuerbaren Energien. Sektorkopplungstechniken ermöglichen die direkte oder indirekte Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energien in allen Anwendungsbereichen. Wobei durch das konsequente Erschließen von Energieeffizienzpotentialen in allen Bereichen (Verkehr, Industrie, Bauen und Wohnen) der Bedarf an Energie reduziert wird. Dort, wo technisch möglich, wird erneuerbarer Strom direkt genutzt. So erfolgt beispielsweise bis 2050 in der Industrie eine Umstellung auf vor allem strombasierte Prozesswärmeversorgung. Insbesondere der Stromsektor wird schnell dekarbonisiert, damit die Integration von Sektorkopplungstechniken und Umstrukturierungen in den Anwendungsbereichen Hand in Hand erfolgen können. Die Digitalisierung leistet einen wachsenden Beitrag zur intelligenten Verknüpfung und Flexibilisierung von Energieverbrauchern und -erzeugern, so dass Back-up-Kapazitäten zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit minimiert werden. Wie heute werden auch künftig vor allem die Brenn- und Kraftstoffe nach Deutschland importiert.

Bis 2050 basieren auch diese vollständig auf erneuerbaren Energien (PtG/L-Anlagen im Ausland). Nur in wenigen Anwendungsbereichen, insbesondere Flugverkehr und Schwerlastverkehr, ist eine brennstoffbasierte Energieversorgung erforderlich.

In der Industrie erfolgt neben der Umstrukturierung hin zu energetisch effizienten auf erneuerbaren Energien basierenden Prozesstechniken auch eine Reduktion der prozessbedingten Emissionen auf das derzeit technisch mögliche Niveau. Elektrofahrzeuge im Individualverkehr und öffentlichen Verkehr sind im Laufe des Transformationspfades schnell Selbstverständlichkeiten und prägen 2050 das alltägliche Bild der Mobilität. Die Umsetzung von Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung durch die Gesellschaft ist in hohem Maße gegeben. Der gesellschaftliche Konsens zur Dekarbonisierung ermöglicht auch den Wandel in der Landwirtschaft. Neben technischen Maßnahmen führen gesündere Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung zu reduzierten Tierbeständen in Deutschland. In Deutschlands Wäldern wird die Entwicklung zu stabilen Mischwäldern konsequent fortgesetzt und somit der Wald als Netto-Kohlenstoffsenke erhalten. Biodiversitätsschutz wird verstärkt in die Waldbewirtschaftung integriert, unterstützt durch die Ausweitung von Prozessschutzflächen mit natürlicher Waldentwicklung. Die zunehmende Verwendung von Sekundärrohstoffen und Materialsubstitution insbesondere in der Metallindustrie, der chemischen Industrie und im Bausektor begünstigen die Materialeffizienz. Demografischer Wandel und Bevölkerungsentwicklung in Deutschland führen zu einem leichten Anstieg der Pro-Kopf-Wohnfläche bis 2030, die absolute Wohnfläche in 2050 entspricht dem des Jahres 2010. Die Flächenneuinanspruchnahme durch Verkehr und Siedlungen wird bis 2030 auf 20 ha/Tag verringert und bewegt sich gen Null bis 2050.

GreenLate

GreenLate („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Late transition“), zeichnet einen möglichen Transformationspfad Deutschlands als weiterhin exportorientierten Industriestandort mit einer modernen leistungsfähigen Gesellschaft. Jedoch erfolgt die Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen deutlich langsamer als in den anderen Green-Szenarien. GreenLate verdeutlicht so, welche Herausforderungen verspätetes Handeln bei der Erreichung einer THG-Minderung um 95 % bis 2050 mit sich bringt. Es setzt jedoch voraus, dass enorme strukturelle Veränderungen und Investitionen in einer kürzeren Zeit insbesondere der Dekade vor 2050 erbracht werden. Dieser Trend zeichnet sich auch auf internationaler Ebene fort (wie bei den GreenEe-Szenarien mit einem zeitlichen Verzug von 10 Jahren).

Im Jahr 2050 fußt die Energieversorgung vollständig auf erneuerbaren Energien. Der Energiebedarf ist jedoch in allen Bereichen deutlich höher als bei den anderen Green-Szenarien. Durch das verzögerte Handeln können Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen nur im begrenzteren Umfang umgesetzt werden. Bis 2050 können effiziente Sektorkopplungstechniken nur in Anwendungsbereiche mit kurzen Erneuerungszyklen integriert werden oder in Bereiche mit hohen Investitionsanreizen. So findet beispielsweise der Übergang zur Elektromobilität für den Individualverkehr spät statt. Dies bedeutet, dass 2050 noch eine Vielzahl der konventionellen Techniken im Verkehr sowie zur Raum- und Prozesswärmeversorgung in Betrieb sind. Damit charakterisiert GreenLate auch die Auswirkungen einer geringeren „Elektrifizierung“ der Anwendungsbereiche. Auch Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung werden vorrangig in den letzten Jahren vor 2050 ergriffen. Der Trend hin zu einer gesünderen Ernährung setzt erst 2025 ein, wodurch ein höherer Anteil an Viehbestand im Vergleich zu den anderen Szenarien resultiert.

GreenMe

Das GreenMe-Szenario („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Material efficiency“) fokussiert auf technische Möglichkeiten zur Steigerung der Materialeffizienz (d.h. Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür benötigten Rohstoff- bzw. Materialeinsatz). Weltweit wird davon ausgegangen, dass andere Länder diesem Trend mit dem gleichen Tempo der technologischen Entwicklung folgen (keine Verzögerung wie in den anderen Green-Szenarien im Vergleich zu Deutschland). Auf diese Weise wird eine Verlagerung von CO_2-Emissionen vermieden. Deutschland ist weiterhin in den internationalen Handel eingebettet, in dem Importe und Exporte ausgeglichen sind (ähnlich dem GreenEe2-Szenario).

Die Energieversorgung und die Umstrukturierung der Bereiche Mobilität, Industrie, Bauen und Wohnen entwickelt sich analog zum GreenEe2-Szenario. Bevorzugt werden jedoch Techniken mit einem geringeren Materialbedarf (gemessen am RMC). So

findet beispielsweise bei der Photovoltaiktechnik ein stärkerer Ausbau auf Dachflächen mit Dünnschichtzellen statt, die einen geringeren Material- und Flächenbedarf haben als konventionelle Photovoltaikfreiflächenanlagensysteme. Ebenso sind Fundamente, Erhöhungen und Windtürme auf Langlebigkeit ausgelegt, so dass ihre Nutzungsdauer deutlich erhöht werden kann. Eine Vielzahl weiterer Materialeffizienzmaßnahmen wird umgesetzt. Diese beinhalten z.B. die Leichtbauweise von Kraftfahrzeugen, die Verwendung alternativer Materialien wie textilverstärkter Beton für das Bauwesen, große Verbreitung von Holzgebäuden oder die Verwendung von biotischen Materialien als Dämmstoffe im Bausektor. Die Annahmen in Bezug auf Landwirtschaft und gesunde Ernährung folgen den beiden GreenEe-Szenarien.

GreenLife

Das GreenLife-Scenario („Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – lifestyle changes“) analysiert, wie Änderungen des Lebensstils und Verhaltens neben technischen Maßnahmen die Treibhausgasemissionen und den Rohstoffverbrauch beeinflussen können. Gegenwärtige Trends sowie kleinere Nischenentwicklungen für ein umweltfreundlicheres Verhalten werden im Szenario skaliert.

So steigt die Nachfrage nach langlebigen und reparierbaren Produkten und führt zu Innovationen in den Bereichen Produktions- und Dienstleistungssektoren. Der Wille jedes Einzelnen für eine ambitionierte und umweltbewusste Lebensweise zeigt sich auch in der Nachfrage nach Wohnraum und somit in der Entwicklung des Gebäudebestands. Es setzt sich eine modulare Bauweise durch, die eine relativ flexible Nutzung der Wohnfläche ermöglicht. Auch Altbauwohnungen und Einfamilienhäuser werden verstärkt umgebaut mit dem Ziel kleinerer Wohneinheiten und einen höheren Grad an Flexibilisierung zu erhalten. Formen des gemeinschaftlichen Wohnens finden einen breiten gesellschaftlichen Zuspruch. Der Anteil der Mehrfamilienhäuser am Gebäudebestand steigt. In der Folge sinkt die Pro-Kopf-Wohnfläche, und die Flächeninanspruchnahme wird bereits bis 2030 auf 10 ha/Tag reduziert und bewegt sich bis 2050 in Richtung Netto-Null. Rohstoffeffizientes Bauen ist bei neuen Gebäuden ebenso verbreitet wie ein steigender Anteil von Wohnhäusern in Holzbauweisen.

Die ambitionierte und umweltbewusste Lebensweise zeigt sich besonders deutlich auch im Mobilitätsverhalten der Gesellschaft. Nationale Flugreisen finden immer weniger Akzeptanz und innerdeutsche Fernreisen werden in 2050 überwiegend mit bodengebundenen Verkehrsmitteln unternommen, sowohl privat als auch geschäftlich. Auch internationale Urlaubsflüge verlieren an Bedeutung, so dass der inländische Fernreiseverkehr zunimmt. Insgesamt steigt somit der Flugverkehr bis 2050 nur marginal gegenüber 2010. Auch der zunehmende Trend der Urbanisierung zeigt sich in der Mobilität. Insbesondere im städtischen Raum verliert der motorisierte Individualverkehr rasch an Bedeutung. Fuß- und Radverkehr nehmen ebenso deutlich zu, wie die Nutzung des öffentlichen Nahverkehrs, ergänzt um Car- und Ridesharing. Dies führt dazu, dass bis 2050 im urbanen Raum der Besitz des eigenen Pkw eine Seltenheit geworden ist.

Gestiegenes Umwelt- und Gesundheitsbewusstsein sind wichtige Leitmotive in der Ernährung. Lebensmittelabfälle werden möglichst vermieden und eher regionale und saisonale Lebensmittel verarbeitet. Deutlich schneller als in den anderen Green-Szenarien werden weniger tierische Produkte verzehrt, so dass die Tierbestandszahlen in Deutschland schneller und stärker abnehmen.

Die technischen Maßnahmen, wie etwa die Transformation des Energiesystems oder Integration neuer effizienter Techniken in der Industrie, Mobilität und Gebäude erfolgt wie in GreenEe1 und GreenEe2.

GreenSupreme

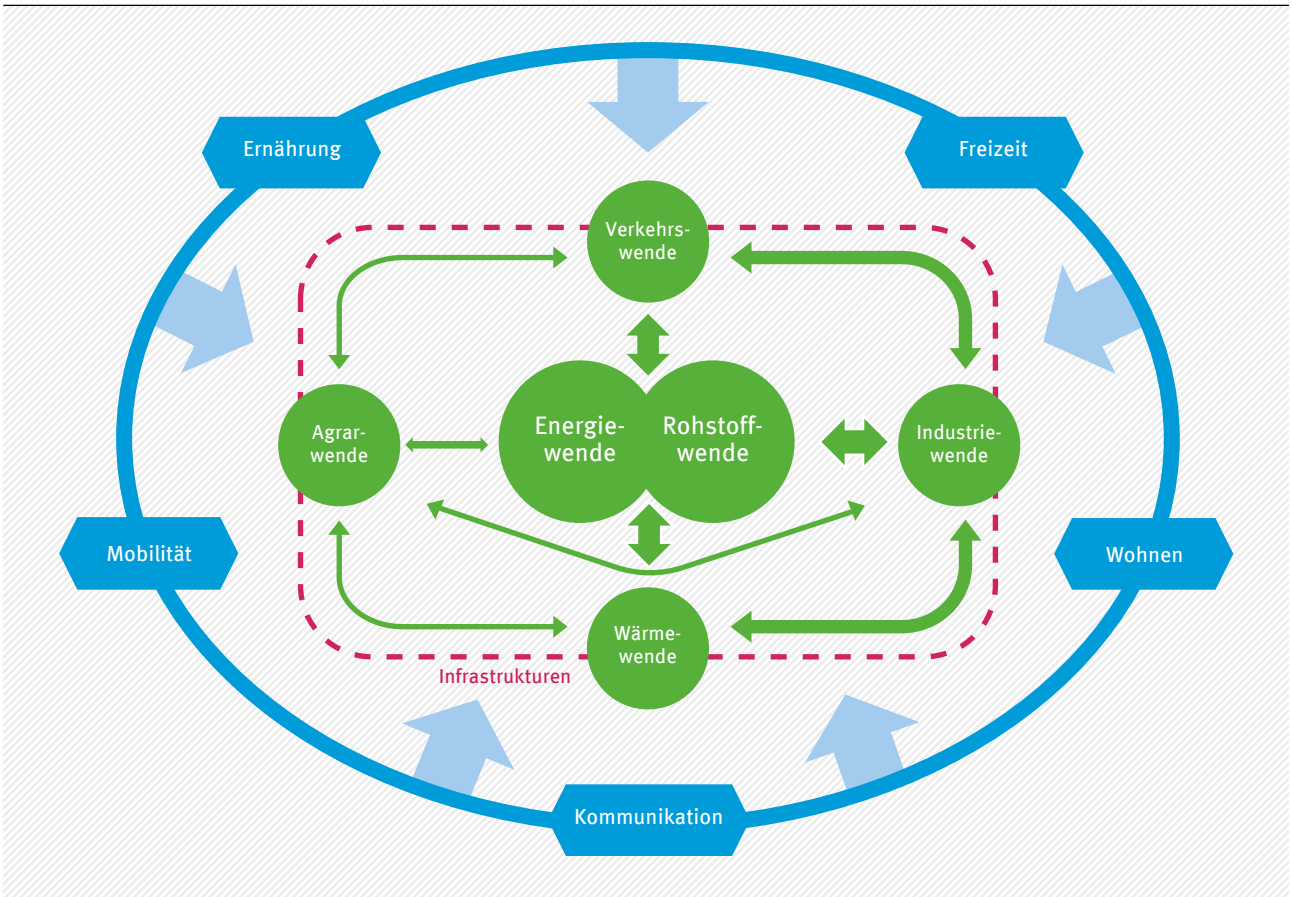
In GreenSupreme (“Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Minimizing future GHG emissions and raw material consumption”) werden die effektivsten Maßnahmen aus den vorangegangenen Green-Szenarien zur ambitionierten schnellen Minderung der Treibhausgasemissionen und des Rohstoffverbrauchs bis 2050 zusammengefasst. Somit werden in diesem Szenario die Maßnahmen von GreenMe zur Materialeffizienz, von GreenEe zur Energieeffizienz und von GreenLife zur nachhaltigen und gesunden Lebensweise werden kombiniert. Im Gegensatz zu anderen Green-Szenarien, die von einem durchschnittlichen jährlichen BIP-Wachstum von rund 0,7 % ausgehen, wird in GreenSupreme ein jährliches BIP-Wachstum ab 2030 von Null angenommen.

3 Handlungsfelder

In allen Bereichen der Gesellschaft müssen Beiträge zum Klima- und Ressourcenschutz geleistet und im Transformationspfad beim Voranschreiten ganzheitlich betrachtet werden. Über verschiedene Faktoren, Wechselwirkungen und das alltägliche Handeln jedes Einzelnen sind alle Bereiche, also Angebot und Bereitstellung von Energie und Rohstoffen mit der Nachfrage durch Produktionsbereiche, Infrastrukturen sowie den individuellen Konsum, mit einander verknüpft, siehe Abbildung 4. Dabei sind die Wechselwirkungen, wie an der unterschiedlichen Pfeilstärke in Abbildung 4 symbolisiert, in unterschiedlichem Maße ausgeprägt. Über Bedürfnisse und Konsumverhalten in Freizeit, Wohnen, Kommunikation, Mobilität und Ernährung (blaue Sechsecke) generiert jeder Einzelne entsprechende Bedarfe, welche wiederum auf die Entwicklung der verschiedenen Produktions- und Dienstleistungsbereiche wirken. Die Bereitstellung dieser Produkte und Dienstleistungen führt zu Ressourceninanspruchnahmen (Rohstoffe, Fläche, Wasser, etc.) sowie Umweltwirkungen (z.B. Treibhausgasemissionen) und sozialen Wirkungen (z.B. Korruption, gewalttätige Konflikte). In besonderer Weise ist die Umstrukturierung der Energieversorgung (Energiewende) und das Umdenken bei der Primärrohstoffinanspruchnahme hin zu einem geringeren „Rohstoffabdruck Deutschlands“ (Rohstoffwende) (grüne Kreise im Zentrum der Abbildung 4) mit den Anpassungen der Anwendungsbereiche und umgekehrt verknüpft (kleine grüne Kreise). Damit wird deutlich, dass die Transformation in allen Bereichen unter Aspekten des Klima- und Ressourcenschutzes Hand in Hand gehen muss. Dabei ist die richtige Balance zwischen Klimaschutz und Ressourcenschonung hinsichtlich der Ausbaugeschwindigkeit zu finden, um eventuell Rohstoffbedarfsspitzen und kumulierte Treibhausgasemissionen zu minimieren und gleichzeitig die richtigen Anreize zu setzen, um die langfristige Wirkung von Maßnahmen und Einsatzbereitschaft von Techniken sowie die dafür erforderlichen Infrastrukturen bereit zu stellen. In den nachfolgenden Kapiteln wird die Umstrukturierung der einzelnen Bereiche betrachtet, wobei diese Wechselwirkungen weitestgehend bedacht werden.

Abbildung 4

Schematische Darstellung des gemeinschaftlichen Transformationspfades



Quelle: Umweltbundesamt

3.1 Energie

Deutschlands Energieversorgung basiert derzeit hauptsächlich auf der Nutzung fossiler Rohstoffe. Die energiebedingten Emissionen verursachten 2018 etwa 84 % der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland. Die Energieversorgung und deren Umstrukturierung nehmen daher eine zentrale Rolle bei der Begrenzung des Klimawandels ein. Vor dem Hintergrund der nach heutigem Kenntnisstand begrenzten Emissionsminderungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft und Industrie ist eine vollständige Vermeidung von Treibhausgasen in der Energieversorgung erforderlich. Die Umstrukturierung von einem fossil-atomaren, ressourcenintensiven Energiesystem hin zu einem umweltschonenden und treibhausgasneutralen Energiesystem kann gelingen, wenn

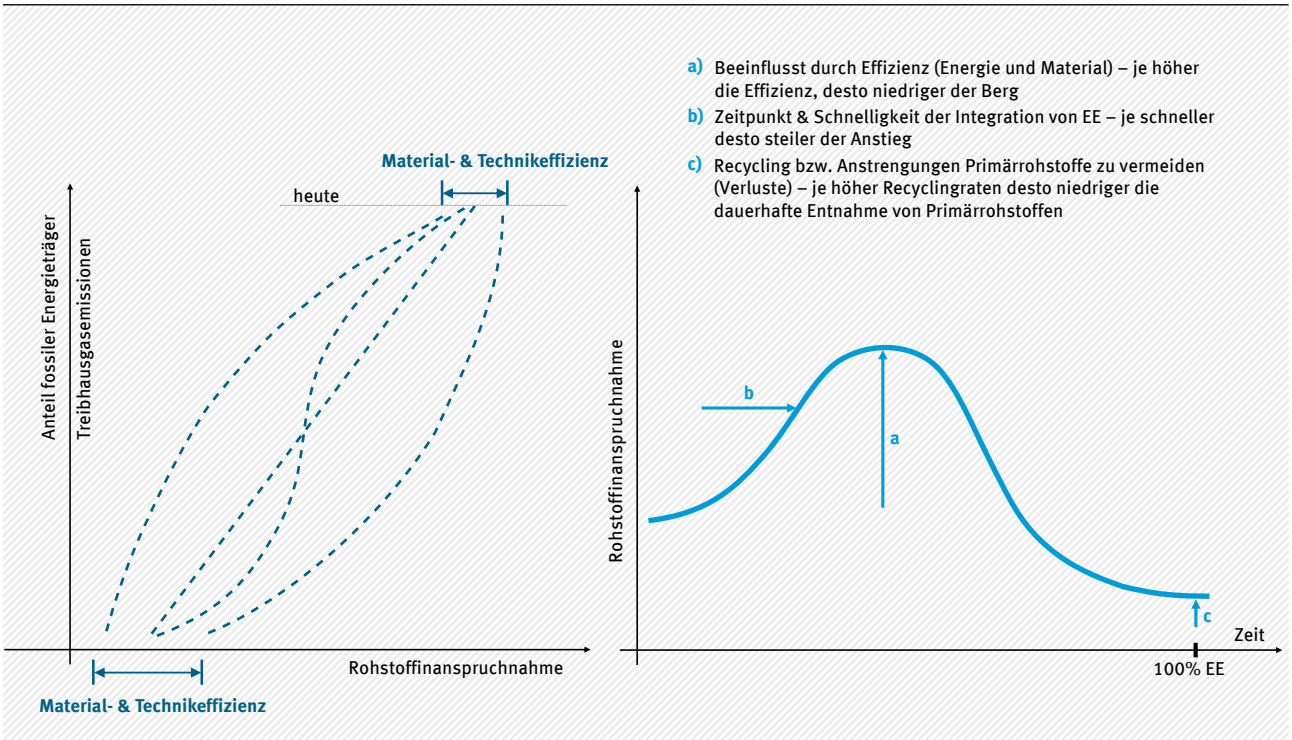
- Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale über alle Bereiche hinweg erschlossen werden und der Bedarf an Energie reduziert wird,
- eine vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien erfolgt,
- eine effiziente Integration von Sektorkopplungstechniken stattfindet und
- dies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

Das Umweltbundesamt hat bereits mit verschiedenen Studien gezeigt, dass eine solche Energiewende ohne Kohlendioxid-Abtrennung und Speicherung (CCS), ohne energetische Nutzung von Anbaubiomasse und ohne Atomenergie gelingen kann.

In Folge der Substitution fossiler Energieträger können die energiebedingten Treibhausgasemissionen vollständig reduziert werden. Gleichzeitig wird der fossil bedingte Anteil, der heute rund 30 % der Primärrohstoffinanspruchnahme beträgt, reduziert, siehe qualitative Darstellung in Abbildung 5 (S. 21). Eine vollständige Reduktion der Primärrohstoffinanspruchnahme ist aufgrund von Wachstumseffekten, funktionalen Verlusten, Downcycling und dissipativen Verwendungen von Materialien technologisch und thermodynamisch nicht gänzlich zu vermeiden (Cullen, 2017; Mayer et al., 2019). Die Menge der

Abbildung 5

Qualitative Darstellung der Änderungen der Treibhausgasemissionen und Rohstoffinanspruchnahme aus der Energieversorgung (links) sowie qualitative Darstellung der Rohstoffinanspruchnahme in Abhängigkeit der Umstrukturierung des Energiesystems auf erneuerbare Energien (rechts)



Quelle: Umweltbundesamt

verbleibenden erforderlichen Primärrohstoffe wird von den Faktoren Energieeffizienz, Materialeffizienz während Produktion und Nutzung der eingesetzten Technik sowie der Lebensdauer und Reparierbarkeit und dem Beitrag von Recycling, also Recyclinggrad und Recyclinganteil, bestimmt. Gleichwohl besteht zum Aufbau des erneuerbaren Energiesystems ein zumindest zeitweise erhöhter Rohstoffbedarf, vor allem an metallischen Rohstoffen. Über die Energieeffizienz, den Energiebedarf der Anwendungsbereiche, die Materialeffizienz und Technikwahl kann die Höhe der erforderlichen Primärrohstoffinanspruchnahme beeinflusst werden. Letztlich wird auch in einem vollständig erneuerbaren Energiesystem eine Primärrohstoffinanspruchnahme erforderlich sein, da vollständiges Recycling nur schwer umsetzbar und technisch kaum möglich ist sowie dissipative Verluste nicht vermeidbar sind. Die Recyclinganstrengungen beeinflussen jedoch die Höhe der Primärrohstoffinanspruchnahme und somit die Höhe der auslaufenden Kurve in Abbildung 5 (rechts, siehe auch UBA, 2019b).

Die Gestaltung der Green-Szenarien soll diesen Einflussparametern gerecht werden und damit den Lösungsraum und die Konsequenzen aus unterschiedlichen Pfaden zur Transformation im Energiesystem aufzeigen. Ein Überblick wird in Tabelle 1 gegeben.

3.1.1 Entwicklung der Endenergienachfrage

Die Endenergienachfrage der Green-Szenarien wird in Abhängigkeit ihrer speziellen Charakteristiken von dem Heben der Energieeffizienzpotentiale, dem Heben der Energievermeidungspotentiale, der Integration von effizienten Sektorkopplungstechniken (PtX) sowie der Geschwindigkeit dieser im Zuge der Transformation bestimmt. Die sich ergebenden Endenergiebedarfe sind für die verschiedenen Szenarien in der Abbildung 6 zusammengefasst. Es wird erkennbar, dass in GreenSupreme bis 2050 die Endenergiebedarfe für energetische Anwendungen um mehr als die Hälfte des heutigen Standes reduziert werden können. In GreenLate wird vor dem Hintergrund der Szenariencharakteristik nur eine Reduktion um etwa ein Viertel erreicht. Offenkundig wird auch die Rolle der direkten Nutzung von Strom durch Sektorkopplung in allen Green-Szenarien. Insgesamt steigt trotz Energieeffizienz der Stromverbrauch infolge der Integration von Power to Heat (über alle Anwendungsbereiche hinweg) sowie Elektromobilität und nationale Power to Gas-Wasserstoff-Elektrolyseanlagen an. In den Green-Szenarien erfolgt die Integration der PtX-Technik unterschiedlich. Dabei werden insbesondere die Sektorkopplungstechniken frühzeitig integriert, die eine hohe Effizienz und hohe Substitutionspotentiale aufweisen, um so auch den höchsten Minderungsbeitrag bei der Treibhausgasreduktion zu erschließen

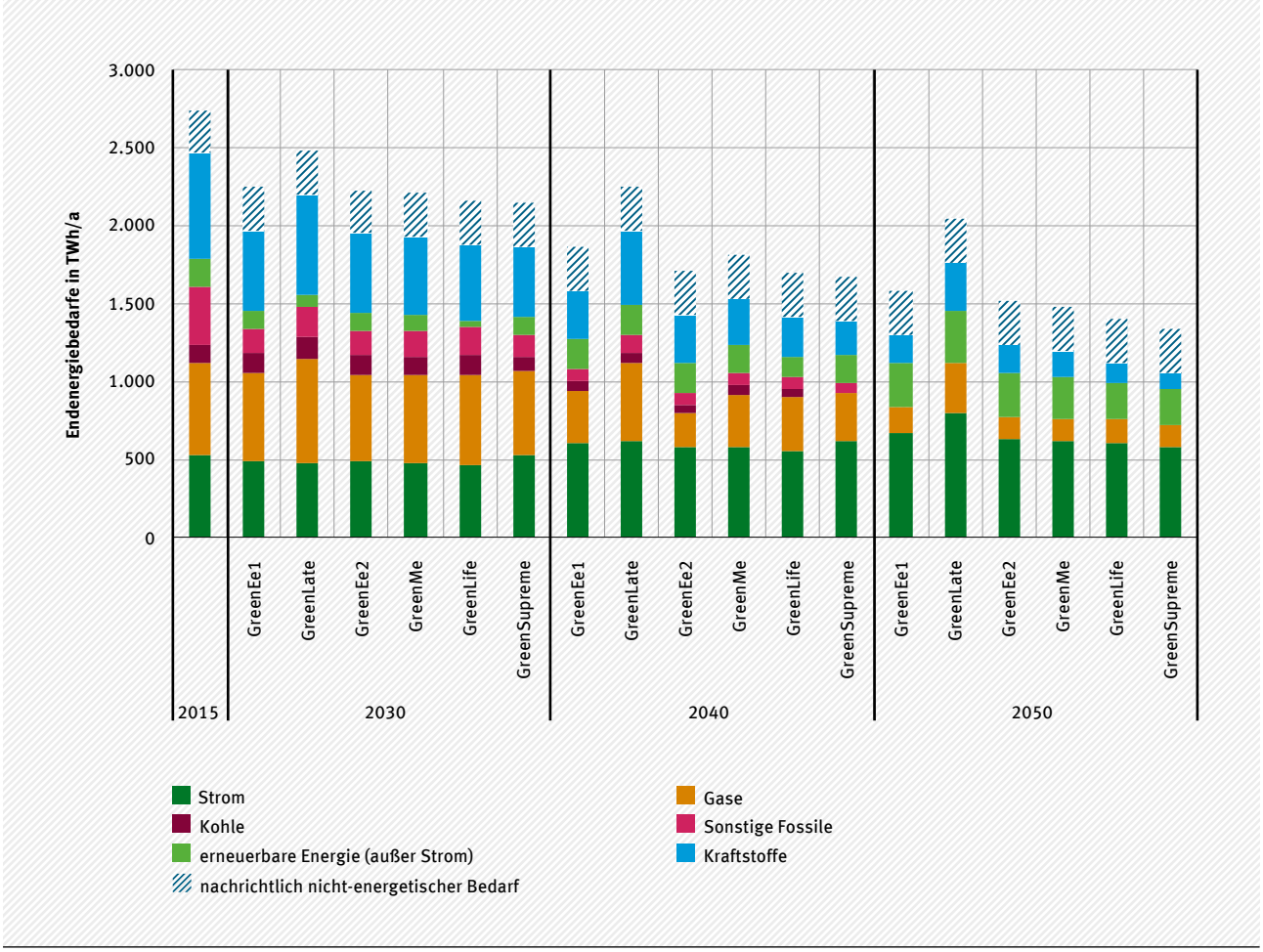
Tabelle 1

Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Energie

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

Abbildung 6

Entwicklung der Endenergiebedarfe nach Energieträgern in den Green-Szenarien



Hinweis: Die Energieträger Strom, Kraftstoffe und Gase sowie der nicht energetische Bedarf basieren zunehmend auf erneuerbaren Energien. 2050 sind sämtliche Bedarfe aus erneuerbaren Energien bereitgestellt.

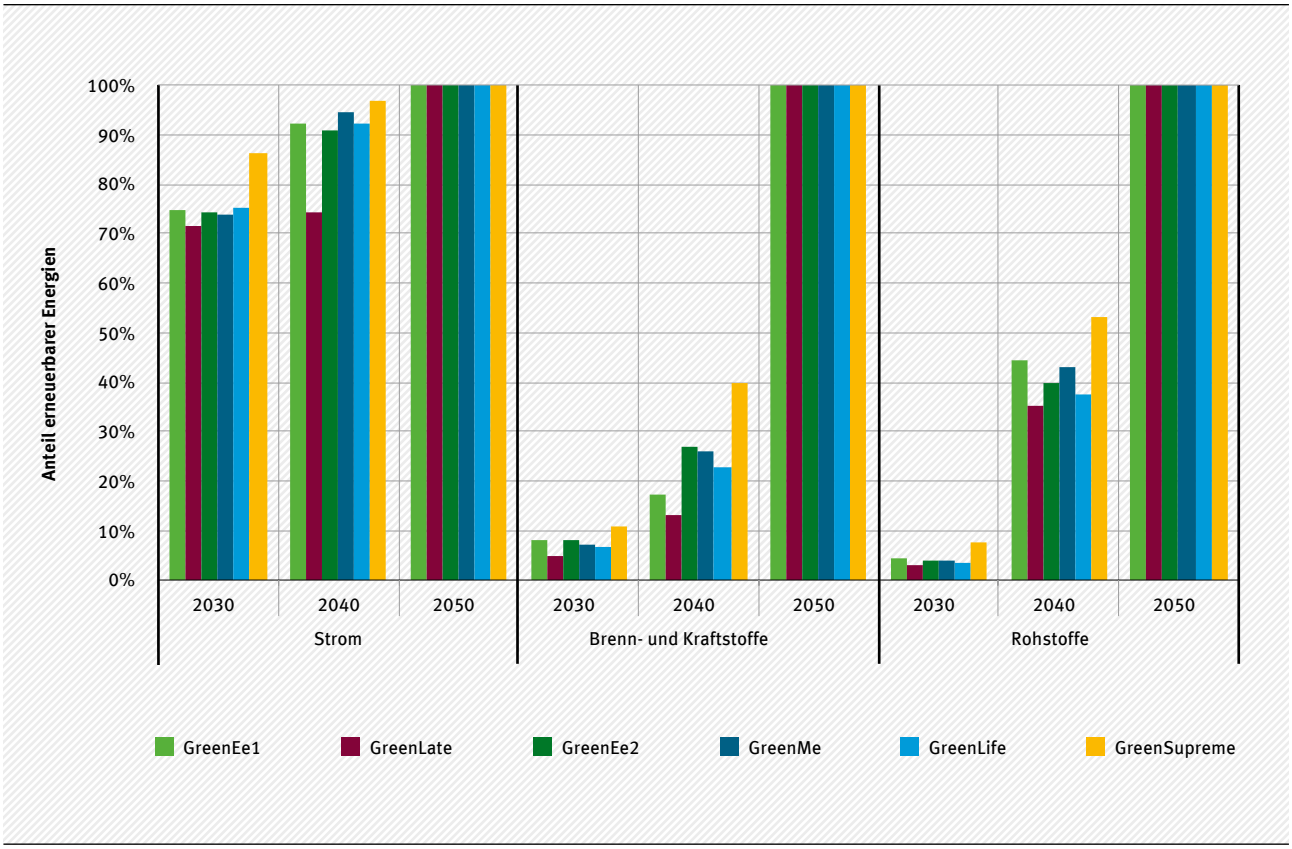
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

(UBA, 2016b). So schreitet insbesondere GreenSupreme ambitioniert voran, und es werden überall dort, wo es technisch möglich ist, bis ins Jahr 2050 fossile Energieträger durch direkte Nutzung erneuerbaren Stroms substituiert. Bereits 2040 kommt Kohle nicht mehr zum Einsatz, auch nicht in der Industrie. Im GreenLate-Szenario hingegen sind Entwicklung und Einführung THG-extensiver Techniken in den Anwendungsbereichen insbesondere der Industrie und Schwerlastverkehr verzögert und erfolgen später als in den anderen Green-Szenarien, so dass zwar die Weichen richtig gestellt, jedoch konventionelle Energietechniken in 2050 noch im Einsatz sind und diese mit erneuerbar erzeugten strombasierten, gasförmigen oder flüssigen Energieträgern versorgt werden müssen. GreenLate gibt dementsprechend auch einen Eindruck der Auswirkungen geringerer „Elektrifizierung“ in den Anwendungsbereichen.

In den privaten Haushalten können insbesondere aufgrund von Sanierung und Modernisierung der Gebäude sowie dem Einsatz von Wärmepumpen und leitungsgebundener Wärmeversorgung Effizienzpotentiale erschlossen und so die Bedarfe bis 2050 deutlich reduziert werden. Bis 2050 wird der Bedarf insgesamt um rund 33 % in GreenLate und bis zu 59 % in GreenSupreme und GreenLife gegenüber 2015 gesenkt (UBA, 2019f). Kohle kommt bereits Ende der 2020er Jahre in allen Szenarien in den privaten Haushalten nicht mehr zum Einsatz. Im Bereich Gewerbe, Handel, Dienstleistungen kann wegen des Erschließens von Effizienzpotentialen bei den energetischen Anwendungen der Bedarf an Endenergie um rund 19 % in GreenLate und bis zu 40 % in GreenSupreme gegenüber 2015 gesenkt werden. Auf Gas als Energieträger wird bis 2050 außer in GreenLate vollständig verzichtet, da der direkte Einsatz von Strom

Abbildung 7

Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien an der Energieversorgung für die verschiedenen Green-Szenarien



Hinweis: Brenn- und Kraftstoffe hier inklusive internationaler Verkehre.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

nicht nur effizienter sondern auch kostengünstiger im Vergleich zu PtG-Methan ist (UBA, 2019f). Auch im Industriesektor werden im GreenLate-Szenario die geringsten Minderungen bei den Endenergiebedarfen erreicht. In 2050 werden in der Industrie noch rund 900 TWh Endenergie[4] benötig, was nur eine geringe Reduktion von etwa 9 % gegenüber 2015 bedeutet. In GreenSupreme erfolgt aufgrund der höheren Ambitionen bei Energie- und Materialeffizienz sowie der Wachstumsbefreiung, eine Reduktion um 33 % auf rund 660 TWh[5]. Im Verkehr, also dem nationalen Verkehr sowie dem von Deutschland verursachten internationalen Verkehr, erfolgt in allen Green-Szenarien entsprechend der technischen Möglichkeiten eine starke Elektrifizierung. Im GreenLate erfolgt dies verspätet, so dass die damit verbundenen Effizienzgewinne bis 2050 noch nicht im selben Maße ausgeschöpft werden können, wie in den anderen Szenarien. GreenLate stellt mit rund 410 TWh den höchsten Endenergiebedarf im Verkehr in 2050 dar. Der Anteil an flüssigen Energieträgern beträgt dabei noch 72 %. Aufgrund der beschleunigten Integration der E-Mobilität und den veränderten verkehrlichen Bedürfnissen in GreenSupreme werden hier 2050 nur gut 190 TWh benötigt, davon 45 % in Form von Strom (UBA, 2019f).

Aus Klimaschutzsicht erfolgt in den Green-Szenarien eine effektive Verwendung von erneuerbarem Strom, also eine schnelle Substitution der fossilen Stromerzeugung. In allen Szenarien ist bereits 2030 der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung über 70 %, in GreenSupreme sogar über 80 %, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. 2040 basiert die Stromversorgung zu über 90 % in allen Szenarien bis auf GreenLate auf erneuerbaren Energien.

In allen Green-Szenarien werden bereits 2030 erneuerbare Kohlenwasserstoffe importiert. PtG/PtL-Produkte werden für den internationalen Luftverkehr

4 Inklusive des nicht-energetischen Bedarfes in Höhe von 282 TWh.

5 Inklusive des nicht-energetischen Bedarfes in Höhe von 282 TWh.

und die chemische Industrie benötigt. Dennoch basiert die Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung bis 2040 im Wesentlichen auf fossilen Energieträgern. Auch hier wird das hohe Ambitionsniveau des GreenSupreme-Szenarios deutlich. Bis 2040 wird vollständig auf die energetische Nutzung von Kohle verzichtet und bereits frühzeitig auch der nationale Kraftstoffmarkt mit erneuerbaren PtL-Kraftstoffen bedient, so dass die Brenn- und Kraftstoffversorgung bereits zu knapp 40 % auf erneuerbaren Energien in 2040 basiert. In der Rohstoffversorgung sind es sogar über 50 %.

Tendenziell steigt der Anteil der erneuerbaren Energien in der Rohstoffversorgung schneller an als in der Brenn- und Kraftstoffversorgung. Hintergrund ist, dass die Rohstoffe der chemischen Industrie Ausgangsbasis für Produkte sind, welche im Sinne der Kreislaufwirtschaft erst nach mehreren Nutzungszyklen energetisch verwertet werden. Dementsprechend werden die Treibhausgasemissionen der Rohstoffe zeitlich versetzt freigesetzt. Brenn- und Kraftstoffe werden hingegen zeitnah verwendet, so dass deren Umstellung auf erneuerbare Energien sich unmittelbar in der Minderung von Treibhausgasemissionen wiederspiegelt. Erst 2050 wird in allen Szenarien eine vollständige erneuerbare Energieversorgung erreicht.

3.1.2 Entwicklung der Stromversorgung

Zentraler Baustein der Klimaschutz- und Ressourcenschutzbestrebungen ist die Umstrukturierung des konventionellen Kraftwerksparkes und die Substitution fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien. Die fossile Stromversorgung verursachte 2017 etwa 32 % der Gesamttreibhausgasemissionen in Deutschland. Durch die sukzessive Stilllegung von Kohlekraftwerken können kurz- und mittelfristig hohe Treibhausgasminderungseffekte und Rohstoffeinsparungen erzielt werden. Eine geordnete Stilllegung von Kohlekraftwerken sorgt dabei für einen planbaren Strukturwandel in den Braunkohleregionen und muss durch einen verstärkten Ausbau erneuerbarer Energien begleitet werden. In den Green-Szenarien wird unterstellt, dass bis 2030 ausschließlich Braunkohlekraftwerke in Betrieb sind, die weniger als 30 Betriebsjahre aufweisen. Dies sind knapp 5,2 GW. Bei der Steinkohle wird für GreenEe1 und GreenLate bis 2030 eine Stilllegung aller Kraftwerke mit mehr als 40 Betriebsjahren unterstellt, so dass sich die Erzeugungskapazitäten bis 2030 auf gut 11 GW reduzieren. Für die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife werden für Braun- und Steinkohlekraftwerke die identischen Vorgaben zur Betriebsdauer unterstellt. Dementsprechend liegt die Steinkohlekapazität in diesen Szenarien bei knapp 9 GW in 2030. Die unterstellten Stilllegungen sind also ähnlich im Vergleich zu den Empfehlungen der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (BMU, 2019a).[6] Bei einer stetigen und linearen Fortführung der Stilllegungen würden die Abschlussdaten für die Kohleverstromung in den Green-Szenarien (außer GreenSupreme) auch im Bereich der Empfehlungen der WSB-Kommission liegen. Die in den Szenarien erforderlichen Treibhausgasminderungen führen bis 2030, zusätzlich zu den unterstellten Stilllegungen, modellendogen zu einer Reduzierung der Volllaststunden der verbliebenen Braunkohlekraftwerke, so dass vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit u.U. eine stärkere Kapazitätsreduzierung erfolgen würde als angenommen. Die Volllaststunden der Steinkohlekraftwerke liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie heute. Insgesamt reduziert sich der Beitrag der Kohleverstromung (Braun- und Steinkohle) an der Bruttostromerzeugung von heute 34,4 % (BMWi, 2019) auf maximal 14 % (74 TWh) in 2030. In GreenSupreme erfolgt bereits 2030 keine Kohleverstromung mehr. Dieses höhere Ambitionsniveau ist erforderlich, um Treibhausgasemissionen schnell zu reduzieren und den internationalen Bestrebungen zur Eindämmung der globalen Erwärmung unterhalb einer 1,5 Grad Obergrenze gerecht zu werden.

Anders als Kohlekraftwerke werden Gaskraftwerke[7] auch künftig für eine sichere Energieversorgung Deutschlands benötigt. Aus der Modellierung der Green-Szenarien ergibt sich ein differenziertes Bild, damit zusammenhängend, dass keine exogenen Maßnahmen oder Annahmen[8] unterstellt wurden. Weil im GreenLate-Szenario grundsätzlich ein ineffizienterer Pfad im Vergleich zu den anderen Szenarien skizziert wird und die Treibhausgasminderungen in der Energieversorgung bis 2040 in geringerem Maße erfolgen, ist mit einem Ausbau der Gas-KWK-Kapazitäten zu

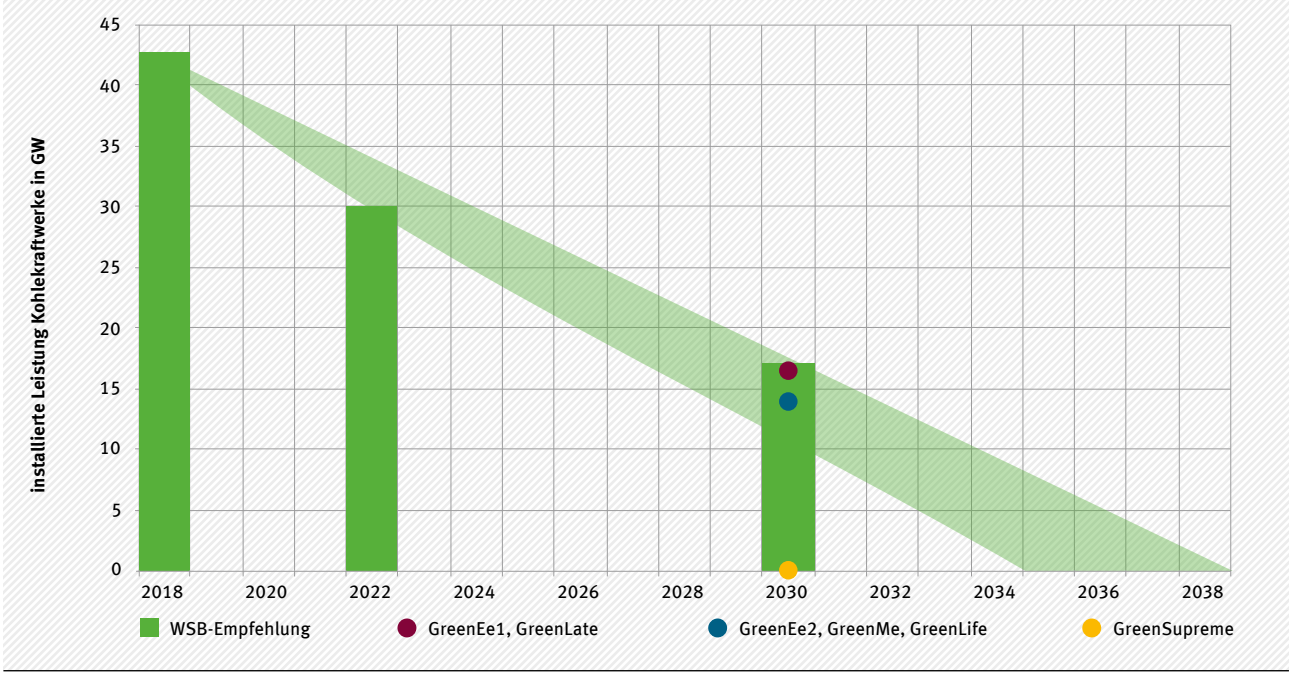
6 Weitere Informationen sind in der Langfassung der RESCUE-Studie zu finden (UBA,2019f).

7 Gaskraftwerke basieren zunehmend nach 2040 auf erneuerbaren Gasen, siehe Kapitel 5.2.3.1 in (UBA, 2019f).

8 Es wurde lediglich davon ausgegangen, dass Gaskraftwerke nach 40 Jahren Betriebsdauer außer Betrieb gehen und bei Bedarf ersetzt werden.

Abbildung 8

Kohlekraftwerke in den Green-Szenarien im Vergleich zu den Empfehlungen der WSB-Kommission



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von BMU, 2019a und UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

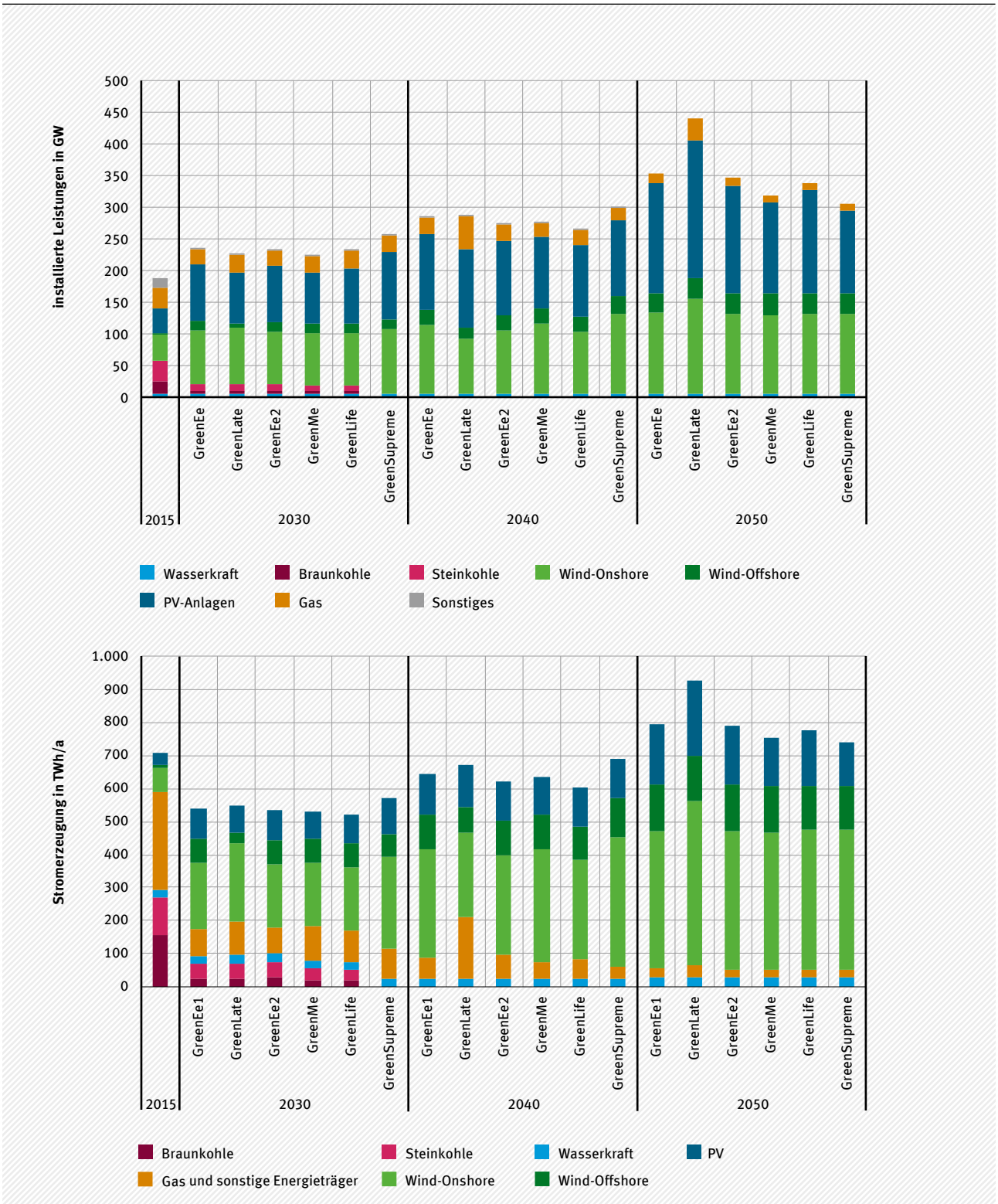
rechnen. Und zwischenzeitlich auch mit einem erhöhten Bedarf an Gasturbinen. In 2050 ist in GreenLate eine höhere installierte Leistung an gasbasierten Kraftwerken als heute zu verzeichnen. Die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife zeigen nach 2030 bis 2050 eine deutliche Reduzierung der Gaskraftwerke, wohingegen in 2030 und 2040 noch ein Zubau an Gas-KWK-Anlagen im Vergleich zu heute zu verzeichnen ist, der bis 2050 jedoch wieder unter 5 GW und unter den heutigen Kapazitäten liegt. Die Volllaststunden der Gasturbinen begrenzen sich in allen Green-Szenarien auf wenige Stunden und auch bei den gasbasierten KWK-Systemen ist eine deutliche Reduktion der Vollaststunden zum heutigen Stand zu erkennen (UBA, 2019f).

Der Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromversorgung wird neben dem Ausstieg aus der fossilen Stromversorgung und dem anvisierten Treibhausgasminderungsziel auch durch die Entwicklungen des zu deckendenden Strombedarfs beeinflusst, der sowohl von Effizienzmaßnahmen also auch der Integration von Sektorkopplungstechniken abhängt. Ein zusätzlicher Einflussfaktor ist der Rückbau von erneuerbaren Energieanlagen entsprechend der Lebensdauer. Zentrale Techniken sind die Windenergie an Land und Photovoltaik. So steigen bis 2030 die Erzeugungskapazitäten bei Windenergie an Land bereits auf 82 GW in GreenEe2, GreenMe und GreenLife, knapp 84 GW in GreenEe1 und 88 GW in GreenLate. In GreenSupreme werden bereits 103 GW benötigt, siehe Abbildung 9. Bis 2050 steigen diese weiter auf etwa 128 GW in allen Green-Szenarien an, außer in GreenLate, bei dem mit rund 150 GW ein deutlich stärkerer Ausbau erforderlich ist. Bis 2050 basieren 52 bis 54 % und in GreenSupreme sogar 57 % der Stromversorgung in Deutschland auf Windenergie an Land. Die Erzeugungskapazitäten von Photovoltaik werden gegenüber heute etwa verdoppelt. 2030 sind zwischen 81 GW (GreenLate und GreenMe) und 104 GW Photovoltaik in GreenSupreme ausgebaut. Bis 2050 steigt die installierte PV-Leistung auf rund 131 GW in GreenSupreme und bis zu 218 GW in GreenLate an. Transformationspfade, die – wie in GreenLate – effiziente Sektorkopplung nicht konsequent umsetzen, also weniger „Elektrifizieren“, sind mit erhöhtem Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen verbunden, wie in Abbildung 9 deutlich zu erkennen ist.

Bei Windenergie auf See, als dritte Säule der erneuerbaren Stromversorgung, spiegeln die Green-Szenarien den derzeit gesetzlich verankerten Ausbaupfad bis 2030 wieder. So werden in allen Szenarien bis

Abbildung 9

Entwicklung der Stromerzeugung in den Green-Szenarien (oben installierte Leistung und unten Stromerzeugung)



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

2030 15,6 GW installiert. Ausnahme ist GreenLate, wo sich der Ausbau verzögert und nur 7,5 GW im Jahr 2030 installiert sind. Die Ausbaupfade setzen sich in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife fort, so das 2040 knapp 24 GW und bis 2050 rund 32 GW installiert sind. GreenLate holt die Verzögerungen insbesondere in der letzten Dekade bis 2050 vollständig wieder auf. GreenSupreme steigert nach 2030 den Ausbau von Wind offshore und erreicht bereits 2040 eine installierte Leistung von gut 27 GW. In 2050 basieren damit rund 18 % der Stromerzeugung auf Wind offshore-Anlagen, in GreenLate aufgrund des höheren Strombedarfes nur 15 %.

Die Wasserkraft trägt in allen Green-Szenarien bereits ab 2030 mit einer installierte Leistung von 5,2 GW mit 24 TWh/a zur Stromversorgung bei. Für die tiefe Geothermie ergibt sich zwar eine Verzehnfachung der bereitgestellten Strommenge, jedoch ist der Beitrag in allen Green-Szenarien mit höchstens 1,5 TWh/a sehr gering.

Biomasse, welche im Jahr 2018 mit 43,3 TWh Strom, 132 TWh Wärme und 31,6 TWh Kraftstoff zur Energieversorgung beitrug, basiert zu großen Teilen auf Anbaubiomasse, zu deren Produktion 2018 2,2 Mio. ha Ackerfläche (FNR, 2019) benötigt werden. Damit einhergehen Nutzungskonkurrenzen um Flächen, auch für potentielle Kohlenstoffsenken, sowie negative Auswirkungen auf Wasser, Boden, Biodiversität und Naturschutz, siehe auch (UBA, 2013). In allen Green-Szenarien erfolgt bis etwa 2030 ein Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse. Auch die energetische Nutzung von Waldrestholz wird in allen Green-Szenarien stark rückläufig unterstellt und erfolgt bis 2050 aufgrund von umwelt- und naturschutzfachlichen Vorteilen beim Verbleiben des Restholzes im Wald nicht mehr. So werden die natürlichen Kohlenstoffsenken und die Biodiversität gestärkt. Bis 2050 trägt die Bioenergie aus Reststoffen zwischen 4,7 bis 5,6 TWh Strom, knapp 34 TWh Prozesswärme und 20,6 TWh Biogas und Ethanol zur Energieversorgung bei.

Die Entwicklung der Stromversorgung ist in Abbildung 9 zusammenfassend dargestellt. Für den hier dargestellten Ausbau erneuerbarer Energien ist für Windenergie an Land ab sofort ein durchschnittlicher jährlicher Bruttozubau von mindestens 4 GW und bei der Photovoltaik von mindestens 3,5 GW[9] notwendig, siehe Abbildung 10. Dieser Ausbau stellt das Minimum dar, da die in den Green-Szenarien unterstellten Effizienzmaßnahmen als sehr ambitioniert betrachtet werden können. Wenn die Effizienzmaßnahmen in den Anwendungsbereichen nicht ausreichend ergriffen werden, ist ein höherer Ausbau der erneuerbaren Energien erforderlich, um dennoch die skizzierten Treibhausgasminderungsziele zu erreichen. Um den internationalen Verpflichtungen im Rahmen der Vereinbarung von Paris gerecht zu werden, sind sogar Zubauraten von mindestens 5,5 GW/a bei Windenergie an Land und 4,8 GW/a bei Photovoltaik erforderlich.

Um die Transformation möglichst gleichmäßig zu gestalten, sind stetige Anpassungen der Ausbaufade notwendig. Abrupte politische Kursänderungen sind zu vermeiden. Entsprechend der Entwicklungen (z.B. des Stromverbrauchs) sind frühzeitig und fortwährend die notwendigen Steigerungen der Bruttozubaubedarfe anzupassen. Dabei kann auch die Verlängerung der Betriebsdauern bedacht werden, da der Ersatz von rückgebauten Kapazitäten eine zunehmende Rolle für die notwendigen Ausbaupfade spielt und sich Maßnahmen zu verlängerten Betriebsdauern der Anlagen günstig auswirken (UBA, 2019f).

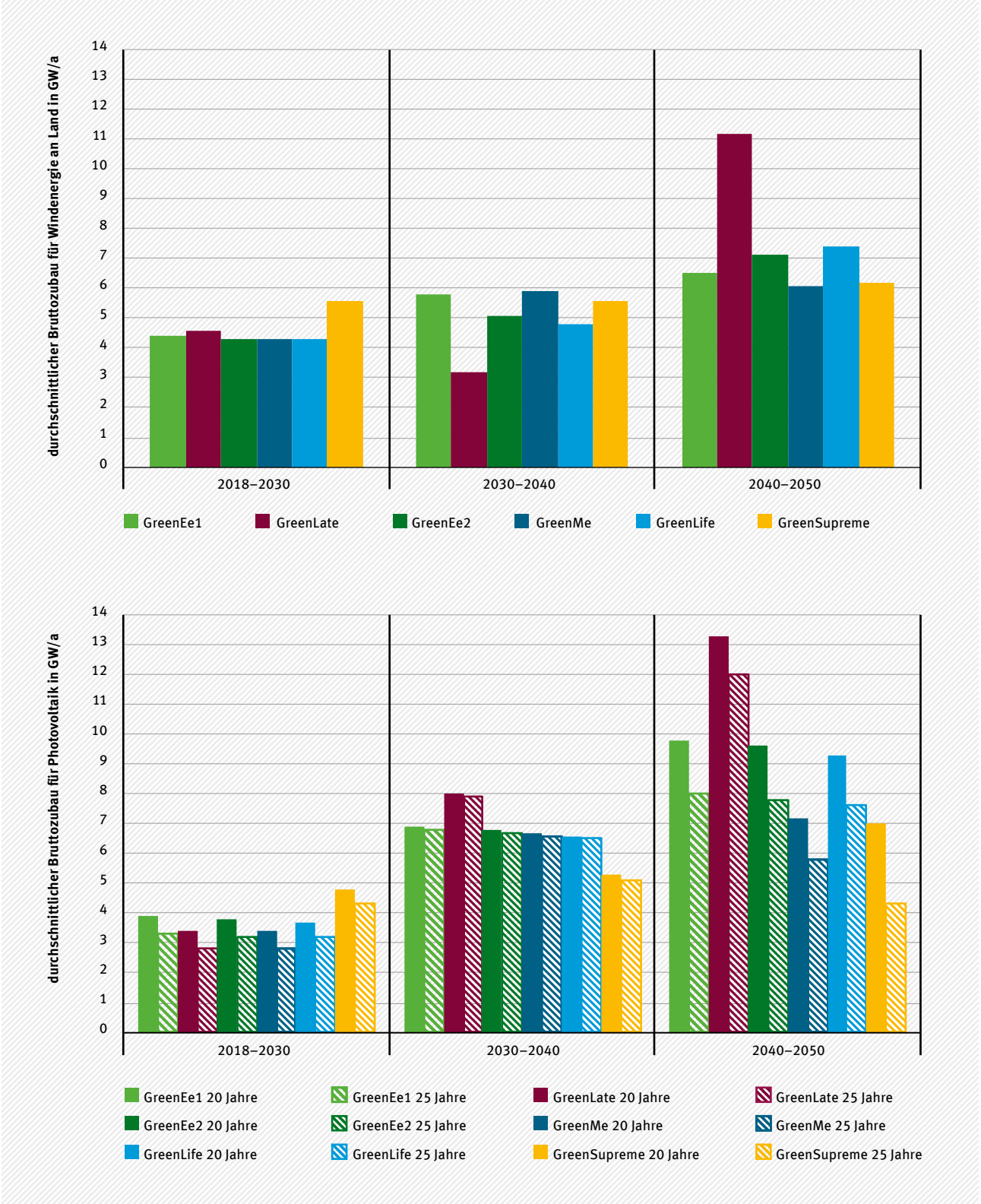
Insbesondere für den erforderlichen Ausbau der Windenergie an Land sind die Herausforderungen jedoch sehr groß. Das bis 2030 maximal mögliche Potential an neu installierbaren Anlagen auf den planungsrechtlichen ausgewiesenen Flächen beträgt 55,4 GW, wenn von den heute installierten Anlagen bis 2030 ein Rückbau um etwa 20 GW mit Auslaufen der EEG-Förderung nach 20 Jahren erfolgt (UBA, 2019i). Das realisierbare Potential wird aufgrund von erheblichen Unsicherheiten voraussichtlich erheblich darunter liegen.[10] Weiterhin sind der Rückbau und das Repowering von heutigen Anlagen zu berücksichtigen. Mit Auslaufen der EEG-Förderung für alle Anlagen, welche bis einschließlich 2000 in Betrieb genommen wurden, ist ab 2021

9 Bei einer Laufzeit von 20 Jahren wie im EEG. In den Green-Szenarien wird vor dem Hintergrund einer rohstoffschonenden Entwicklung eine Lebensdauer von 25 Jahren unterstellt. Die Auswirkungen sind ausführlich in Kapitel 5.2.3.2.1.2 in (UBA, 2019f) dargestellt.

10 Unsicherheiten sind bspw., dass 34,4 GW auf Flächen entfallen, welche noch nicht final festgelegt sind und 11 GW auf Flächen aus der Bauleitplanung resultieren, für welche keine Angaben zu Status, Alter oder möglichen Höhenbeschränkungen erfasst werden können. Grundlegend spielt die Nicht-Nutzbarkeit von ausgewiesenen Flächen, bspw. aus wirtschaftlichen, genehmigungs- oder privatrechtlichen Gründen, eine große Rolle. So wurden auf 23 % der Flächen, welche bis Ende 2014 ausgewiesen wurden, bisher keine Anlagen installiert.

Abbildung 10

Durchschnittlicher Bruttozubau für die Umsetzung der Green-Szenarien in den jeweiligen Zeiträumen in GW pro Jahr (oben Windenergie an Land und unten Photovoltaik)



Hinweis: Für Windenergie an Land sind 20 Jahre Lebensdauer unterstellt.

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von BMU, 2019a und UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

mit erheblichen Rückbauzahlen[11] zu rechnen. Etwa die Hälfte der Anlagen (und deren Leistung) stehen außerhalb der heute planungsrechtlich festgesetzten Flächen und sind damit aus planungsrechtlicher Sicht in der Regel nicht repoweringfähig (UBA, 2019i). Der sich so abzeichnende Flächenengpass für die tatsächlich nutzbaren Flächen muss zeitnah zu ambitionierten Ausweisungszielen in den Ländern und Regionen führen. Es bedarf gesellschaftlicher Akzeptanz, vor allem auch auf der lokalen Ebene, um einen weiteren Ausbau gemäß den in den Szenarien skizzierten Ausbaupfaden erreichen zu können.

3.1.3 Entwicklung der Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung

Erneuerbare Brenn-, Kraft- und Rohstoffe oder PtG/PtL-Produkte werden langfristig im Bereich der nationalen Personen- und Güterverkehre (inkl. Binnenschifffahrt), der internationalen Luft- und Seeverkehre, der chemische Industrie, zur Wärmeversorgung, insbesondere Prozesswärme in der Industrie, sowie zur stabilen Stromversorgung (Speicher und Rückverstromung) benötigt. Deren Versorgung ist qualitativ in Abbildung 11 zu sehen.

Die Bedarfe dieser Bereiche sind stark unterschiedlich, und es besteht unterschiedlicher Handlungsdruck. So wird in den Green-Szenarien unterstellt, dass im Jahr 2030 zuerst relevante Anwendungen in der Industrie und der internationale Luftverkehr mit erneuerbaren importierten PtG/PtL-Produkten zu gleichen Anteilen versorgt werden. Konkret werden langlebige Produkte durch frühzeitige Substitution fossiler Ausgangsstoffe in der chemischen Industrie auf Basis erneuerbarer Energien produziert. Anderenfalls würden langlebige Produkte am Ende einer Kaskadennutzung erst nach 2050 oder einem noch späteren Zeitpunkt zu fossilen Treibhausgasemissionen führen. Im Luftverkehr besteht dringender Handlungsbedarf, um sicherzustellen, dass das Ziel der ICAO (International Civil Aviation Organisation) zum treibhausgasneutralen Wachsen ab 2020 neben global marktbasierten Maßnahmen nicht durch den Einsatz von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse erfolgt. Das bedeutet auch, dass in allen Szenarien bis auf GreenSupreme bis 2040 keine PtG/PtL-Produkte in die Bereiche gelangen, die der nationalen Berichterstattung nach UNFCCC oder dem Betrachtungsrahmen der Klimaschutzziele der Bundesregierung unterliegen. Vor diesem Hintergrund kann die Annahme zur Verteilung als konservativ für die gesetzten Klimaschutzziele der Bundesregierung erachtet werden. In GreenSupreme erfolgt ein schnellerer Transformationsprozess und damit eine schnellere Erschließung erneuerbarer strombasierter Energieträger, so dass frühzeitiger alle Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffmärkte mit erneuerbaren strombasierten Energieträgern erschlossen werden.

Erst in der Dekade bis 2050 wird in allen Bereichen in allen Green-Szenarien eine vollständige erneuerbare Energieversorgung erreicht. Das bedeutet, dass auch in der Stromversorgung erst dann die letzten Erdgaseinsätze, wie auch bei den Brenn- und nationalen Kraftstoffen, durch erneuerbare Energien ersetzt werden. In Abhängigkeit der Reduktion der Endenergiebedarfe an Strom und der Verfügbarkeit international konkurrenzfähiger Standorte erfolgt auch im begrenzten Maße die Bereitstellung von national erzeugten strombasierten Brenn- und Kraftstoffen. Vor dem Hintergrund der schnellen Dekarbonisierung der nationalen Stromversorgung wird in GreenSupreme bereits 2040 national erzeugtes PtG-Methan für die allgemeine Gasversorgung bereitgestellt. In den anderen Green-Szenarien erfolgt dies erst eine Dekade später und im geringeren Umfang, für nähere Informationen siehe (UBA, 2019f).

Wie bereits heute wird auch künftig ein erheblicher Anteil der gasförmigen und flüssigen Endenergieträger importiert, so dass keine strukturellen Brüche auftreten werden. Insgesamt werden 2050 rund 8 % in GreenLate und bis zu 24 % in GreenSupreme der Brenn-, Kraft- und Rohstoffbedarfe national bereitgestellt. Die Importabhängig sinkt somit bis auf knapp 50 % der Nettostromerzeugung in GreenSupreme im Jahr 2050. In GreenLate liegt diese 2050 mit rund 65 % in den Green-Szenarien am höchsten und in etwa auf dem heutigen Niveau.[12] Die Integration der erneuerbaren strombasierten Importe ist in Tabelle 2 dargestellt.

Wenn Energieeffizienzpotentiale nicht konsequent erschlossen werden und an konventionellen Techniken festgehalten wird (wie im GreenLate-Szenario) und so eine geringere Elektrifizierung als scheinbar

11 Zwischen 2021 und 2025 mit ca. 14 GW.

12 Heute basieren rund 70 % der Primärenergieversorgung auf Importen.

Tabelle 2

Entwicklung der erneuerbaren Importe in der Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung*

		erneuerbare Nettostrom-erzeugung für Importe in TWh	importierte erneuerbare PtG/PtL-Produkte								
			Summe in TWh	Kraftstoff (int. Verkehre) in TWh	Anteil an Bedarfen in %	Kraftstoff (nationale verkehre) in TWh	Anteil an Bedarfen in %	Brennstoff in TWh	Anteil an Bedarfen in %	Rohstoff in TWh	Anteil an Bedarfen in %
2030	**GreenEe1**	**54**	**24**	12	9	0	0	0	0	12	4
	GreenLate	**64**	**28**	8	7	0	0	0	0	8	3
	GreenEe2	**51**	**22**	11	8	0	0	0	0	11	4
	GreenMe	**53**	**23**	12	9	0	0	0	0	12	4
	GreenLife	**44**	**19**	10	8	0	0	0	0	10	3
	GreenSupreme	**143**	**63**	21	19	21		0	0	21	7
2040	**GreenEe1**	**504**	**233**	108	100	0	0	0	0	125	44
	GreenLate	**725**	**336**	121	86	0	0	0	0	99	35
	GreenEe2	**476**	**220**	108	100	0	0	0	0	113	40
	GreenMe	**490**	**227**	105	100	0	0	0	0	122	43
	GreenLife	**415**	**192**	87	100	0	0	0	0	105	37
	GreenSupreme	**595**	**275**	83	100	42		0	0	151	53
2050	**GreenEe1**	**1.066**	**494**	92	100	112	100	25	21	264	94
	GreenLate	**1.778**	**823**	134	100	199	100	225	71	264	94
	GreenEe2	**1.008**	**467**	92	100	110	100	0	0	264	94
	GreenMe	**1.038**	**480**	89	100	98	100	29	23	264	94
	GreenLife	**878**	**406**	57	100	90	95	0	0	264	94
	GreenSupreme	**802**	**371**	52	100	54	70	0	0	264	94

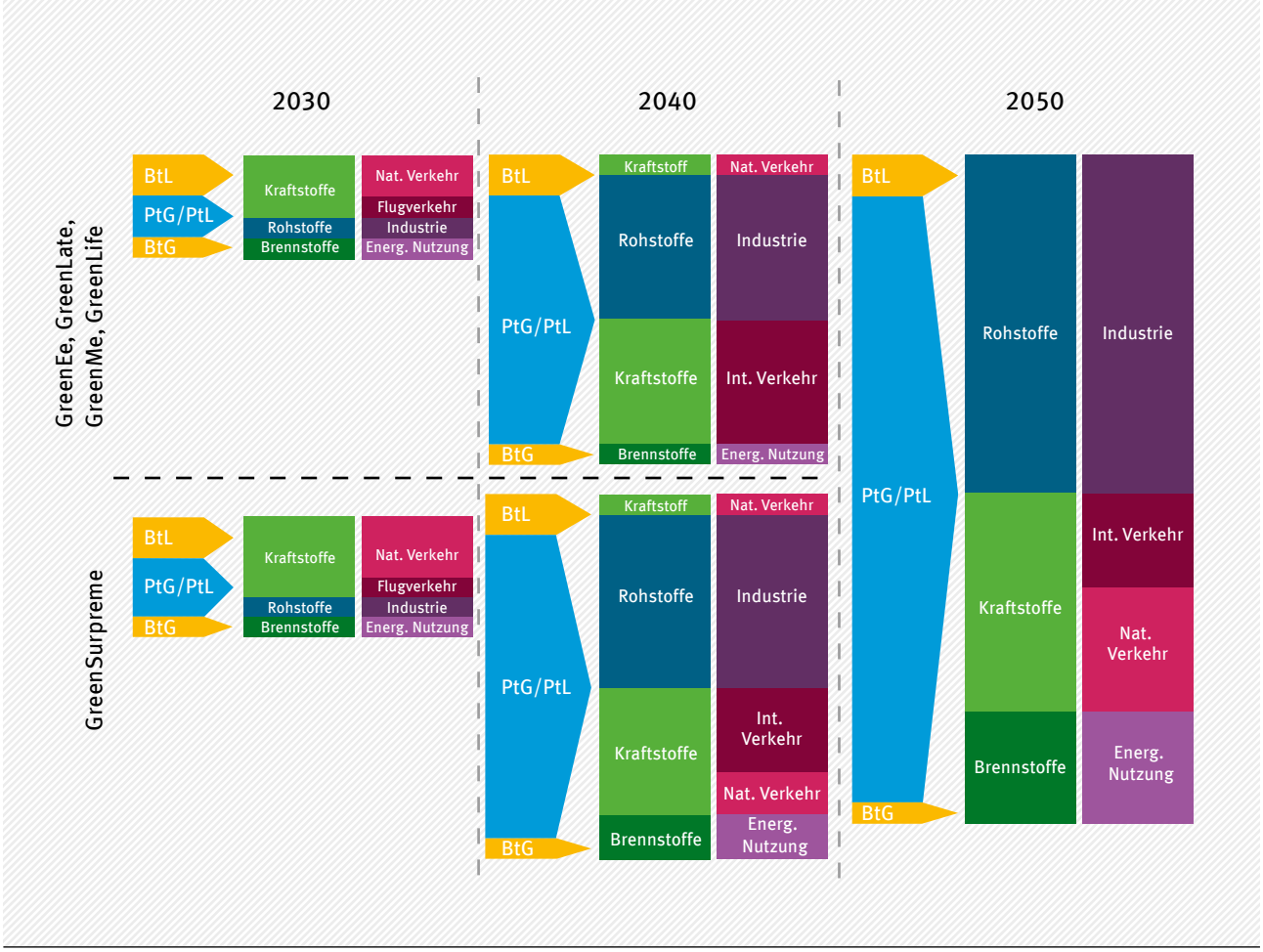
Hinweis: gerundete Werte.

Quelle: UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

* In einem globalen erneuerbaren Energiemarkt sind eine Vielzahl von Standorten denkbar, die konkurrenzfähige stromba-sierte erneuerbare PtG/PtL-Produkte bereitstellen könnten. Über bestehende Infrastrukturen, wie das Gasnetz oder mittels Tanker, können diese nach Deutschland transportiert werden. Jeder einzelne Erzeugungsstandort weist unterschiedliche Charakteristiken bzgl. der Stromerzeugung, Volllaststunden, Kohlenstoffquelle, Transportart, Transportentfernung, etc. auf. Um eine Größenordnung zu den benötigten erneuerbare Stromerzeugungs- und PtG/PtL-Produktionskapazitäten für die Bereitstellung der Importe zu erhalten, wurde beispielhaft für alle Green-Szenarien die Produktion in Nordafrika simuliert. Diese Ergebnisse sind Grundlage der dargestellten Mengen.

Abbildung 11

Qualitative Darstellung der erneuerbaren Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung Deutschlands in den Green-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung

einfacherer Weg gewählt wird[13], muss als Konsequenz im Pfad deutlich mehr erneuerbare Stromerzeugung ausgebaut werden. Konkret werden in GreenLate zwischen 2030 und 2040 durchschnittlich 10 GW Windenergie an Land und 11 GW Photovoltaik pro Jahr benötigt, deren Ausbau sich nach 2040[14] auf durchschnittlich 16,8 GW Windenergie an Land und 18,1 GW Photovoltaik pro Jahr nochmals steigert. In 2050 werden in GreenLate rund 1800 TWh erneuerbarer Strom zur Deckung der importierten PtG/PtL-Bedarfe benötigt, wohingegen in GreenSupreme nur 800 TWh benötigt werden.

3.1.4 Schlussfolgerungen

Auf Basis der Green-Szenarien lassen sich für einen ressourcenschonenden Transformationspfad folgende Schlussfolgerungen zusammenfassen. Genauere Ausführungen und Herleitungen sind in der Langfassung der RESCUE-Studie zu finden (UBA, 2019f).

Der erforderliche Endenergiebedarf beeinflusst wesentlich die Bedarfe an erneuerbaren Energien, Rohstoffen für die Energieversorgungsanlagen, Energieimportabhängigkeit und Ressourceninanspruchnahme (bspw. Fläche). Darüber hinaus unterstützt die Bedarfsreduktion die Integration der erneuerbaren Energien, entlastet diese und leistet insbesondere im Transformationspfad einen wesentlichen Beitrag zur Treibhausgasminderung.

13 Dies bedeutet, dass nicht konsequent die effizienten Sektorkopplungstechniken, wie Wärmepumpe und Elektrofahrzeuge, integriert werden sondern vielmehr an konventionellen Techniken festgehalten wird und diese erst mittel- und langfristig mit erneuerbaren PtG/PtL-Produkten betrieben werden.

14 Analog zu den nationalen Kapazitäten, ist dies ab 2040 in geringem Maße auch auf den Ersatz der Kapazitäten, die das Ende ihrer Lebensdauer erreichen zurückzuführen.

- In sämtlichen Anwendungsbereichen sind schnell ambitionierte Maßnahmen zur Energieeffizienz zu ergreifen, wobei die Rohstoffinanspruchnahme ein gleichwertiges Kriterium sein muss. Dabei sind sowohl ordnungsrechtliche Maßnahmen als auch Förderprogramme für effiziente Techniken und Kontrolle von Energiemanagement zu ergreifen.

- Im alltäglichen Handeln jedes Einzelnen muss ein stärkeres Bewusstsein für die eigene Verantwortung geschaffen werden, um die Nutzung von Energie nachhaltig zu reduzieren.

Sektorkopplung ist der zentrale Baustein für das Gelingen einer treibhausgasneutralen Energieversorgung. Bei der Integration neuer Stromverbraucher, die mittels erneuerbarem Strom eine treibhausgasneutrale Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung ermöglichen, ist von Beginn an auf Effizienz und Effektivität zu achten.

- Die klimafreundliche Integration von PtX-Techniken sollte entsprechend ihres Substitutionspotentials und der effektiven Treibhausgasminderung oberste Prämisse sein. Hierfür sind sofort effiziente Techniken, wie Elektromobilität und Wärmepumpen, in einem breiten Mix an Instrumenten zu fördern und anzureizen.

- Die Rahmenbedingungen, wie die Abgaben, Umlagen und Steuern (inkl. CO_2-Bepreisung) müssen schnell so gestaltet werden, dass effiziente PtX-Techniken insbesondere gegenüber fossilen aber auch ineffizienten PtX-Techniken kostengünstiger sind.

- In der Raumwärmeversorgung sollte vor dem Hintergrund der Vielzahl erneuerbarer Alternativen keine Integration von PtG in der dezentralen Wärmeversorgung erfolgen und auch nicht gefördert werden.

Der vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische und nicht-energetische Anwendungen ist sowohl aus Klima- als auch aus Ressourcenschutzperspektive unabdingbar. Ein Festhalten an fossilen Energien führt dauerhaft zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen in der Atmosphäre und dauerhaft steigender Primärrohstoffinanspruchnahme.

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

- Die Rahmenbedingungen müssen über alle Anwendungen hinweg schnell so gestaltet werden, dass die Nutzung fossiler Energieträger vor dem Hintergrund der resultierenden Klima- und Umweltkosten mittel- und langfristig nicht wirtschaftlich ist.

- Der Ausstieg aus der Kohleverstromung muss schnell umgesetzt werden (bis 2030), um einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der kumulierten Emissionen in der Atmosphäre zu leisten und damit unseren internationalen Verpflichtungen gerecht zu werden.

- Der Ausstieg aus der Kohleverstromung muss schnell ausgeweitet werden auf einen Ausstieg aus der Kohlenutzung insgesamt (bis 2040).

- Der Ausstieg aus der fossilen Wasserstoffwirtschaft ist durch Pilotprojekte von PtG-Wasserstoffanlagen zeitnah vorzubereiten, so dass in der Dekade nach 2030 die Integration von PtG-Wasserstoff-Anlagen erfolgen kann.

- Der Ausstieg aus der Nutzung fossilen Kohlenstoffs in der chemischen Industrie ist mit Forschungs- und Entwicklungsprojekten schnellstmöglich anzugehen. Insbesondere sind relevante Produktionsprozesse von langlebigen Produkten in der chemischen Industrie zu adressieren.

Der Ausbau erneuerbarer Energien hin zu einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung ist aus Klimaschutzperspektive unabdingbar.

- Der jährliche Bruttozubau von Windenergie an Land ist auf mindestens 4 GW und vorzugsweise auf 5,5 GW zu erhöhen.

- Der sich abzeichnende Flächenengpass zur tatsächlich nutzbaren Fläche für die Windenergie an Land ist schnell durch höhere Ausweisungsziele in den Ländern und Regionen zu beheben, um die Erreichung der Klimaschutzziele mittelfristig zu gewährleisten.

- Der jährliche Bruttozubau der Photovoltaik ist auf mindestens 3,5 GW zu erhöhen. Um den Zielen des Pariser Übereinkommens zu entsprechen, wäre ein Ausbau von mindestens 4,8 GW pro Jahr erforderlich.

- Es sind möglichst stetige Ausbaupfade der erneuerbaren Energien unter Berücksichtigung des Rückbaus und der Entwicklungen beim Stromverbrauch anzustreben. Abrupte politische Kursänderungen sind zu vermeiden.

- Der Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse hat mittelfristig zu erfolgen, um Umwelt, Natur und Biodiversität zu stärken. Die energetische Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen sollte hingegen gestärkt werden, wenn keine negativen sondern, wie bei der Vergärung von Gülle, positive Nebeneffekte zu erwarten sind.

Eine vollständige auf erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung in Deutschland gelingt vor allem dann, wenn global ein gemeinschaftliches Verständnis zu ambitioniertem Klima- und Ressourcenschutz besteht. Insbesondere mit Blick auf die begrenzten kostengünstigen Standorte erneuerbarer Energien in Deutschland, wird auch künftig ein Großteil der treibhausgasneutralen Brenn-, Kraft- und Rohstoffe importiert werden.

- Deutschland sollte schnell international und europäisch darauf hinwirken, dass auch andere Staaten bis spätestens 2050 treibhausgasneutral werden.

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

3.2 Bauen und Wohnen

Gebäude prägen über ihre architektonische Gestaltung und ihre funktionale Bauweise unseren Alltag. Vor dem Hintergrund des demografischen Wandels, der gesellschaftlich veränderten Anforderungen bspw. bei Konsum, Urbanisierung, Mobilität oder der Digitalisierung, werden stetig Gebäude modernisiert, saniert und neugebaut. Der Neu-, Um- und Ausbau von Verkehrswegen, Energieinfrastrukturen, Wasser- und Abwasserversorgung unterliegt gleichfalls einem Wandel sowohl an gesellschaftlichen als auch technischen Anforderungen. Bauen und Wohnen ist daher schon immer einem ständigen Wandel unterlegen, der den Ansprüchen der Gesellschaft gerecht werden muss. Hinzu kommen nun verstärkt die Erfordernisse, die Treibhausgasemissionen und die Ressourceninanspruchnahme zu reduzieren sowie den Auswirkungen des Klimawandels entgegen zu treten. Dies kann grundsätzlich erfolgen durch:

- Reduzierung des Endenergiebedarfs durch Sanierungen und Modernisierungen von Gebäuden und hohe Energiestandards beim Neubau,

- Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung von energieeffizienten Techniken,

- Substitution der fossilen Energieträger durch erneuerbare Energien,

- Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme durch flächensparendes Bauen und durch Innenentwicklung sowie

- Steigerung des Sekundärrohstoffeinsatzes und verstärkte Materialsubstitutionen im Hoch- und Tiefbau.

Die Techniken zur Vermeidung der energiebedingten Treibhausgasemissionen des Gebäudebestandes sind bereits im Markt eingeführt und verfügbar. Die Effizienzpotentiale können technisch gehoben und der verbleibende Energiebedarf mit erneuerbaren Energien gedeckt werden. Wegen der langen Modernisierungs- und Erneuerungszyklen ist schnelles Handeln erforderlich. Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Interessen der involvierten Akteursgruppen ist die konsequente und rasche Umsetzung von wirksamen Maßnahmen zur Treibhausgasminderung im Gebäudebereich eine große Herausforderung.

Tabelle 3

Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Bauen und Wohnen

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

Hinweis: EFH - Einfamilienhäuser, ZFH - Zweifamilienhäuser und MFH - Mehrfamilienhäuser.

Wie in Kapitel 3.1 in Abbildung 5 bereits dargestellt, ist mit der Umstellung auf erneuerbare Energien eine vollständige Vermeidung der Treibhausgasemissionen möglich. Die Primärrohstoffinanspruchnahme kann jedoch nach heutigem Kenntnisstand nicht vollständig vermieden werden. Die Wahl der Techniken und Materialien für Gebäude sowohl im Neubau als auch bei Sanierungen bestimmen maßgeblich den Umfang der Rohstoffinanspruchnahme und die jeweils erforderlichen Rohstoffe. Gleichfalls beeinflussen die erforderlichen Um- und Ausbaubedarfe der Verkehrs- und Versorgungsinfrastrukturen, welche ihrerseits maßgeblich auch die Entwicklung der Flächenneuinanspruchnahme beeinflussen, insbesondere mit Blick auf die Neuversiegelung, den Rohstoffaufwand. Daher gilt es, auch Aspekte des flächensparenden Bauens in allen Szenarien zu berücksichtigen, um die Transformation zu einer weitestgehend treibhausgasneutralen Gesellschaft auch mit Blick auf den zusätzlichen Bedarf an der natürlichen Ressource Fläche schonend und effizient zu gestalten.

Durch Variation der Einflussparameter spannen die Green-Szenarien hier einen breiten Lösungsraum auf, wie in Tabelle 3 zum Überblick dargestellt ist.

Zusätzlich wird für alle Szenarien angenommen, dass bis 2020 die Flächenneuinanspruchnahme auf 30 ha/Tag reduziert werden kann. In GreenLife und GreenSupreme führen die angenommene Entwicklung der Wohnfläche und die etwas stärkere Verdichtung (Tabelle 4) zu einem verringerten Bedarf an zusätzlicher Siedlungs- und Verkehrsfläche. Unter anderem hierdurch kann die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche bis 2030 auf 10 ha/Tag reduziert werden. In den weiteren Szenarien wird bis 2030 eine Reduktion auf 20 ha/Tag umgesetzt. Durch eine zunehmende Flächenkreislaufwirtschaft[15] wird entsprechend dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung erwartet, dass in allen Szenarien bis 2050 netto keine weitere Flächenneuinanspruchnahme mehr stattfindet.

3.2.1 Entwicklung der Energiebedarfe und deren Versorgung

Sanierungen und Modernisierungen erfolgen aus unterschiedlichen Interessen heraus. Nicht immer geht dies mit einer energetische Sanierung und Bedarfsreduzierung einher. Vor dem Hintergrund der

15 „Die Flächenkreislaufwirtschaft stellt ein System von Planung, Nutzung, Nutzungsaufgabe, Brachliegen und Wiedereinbringung durch eine dauerhafte Nutzung oder eine zeitlich befristete Zwischennutzung von Flächen dar. Damit wird das aus anderen Wirtschaftsbereichen wie der Abfall- oder Wasserwirtschaft bekannte Kreislaufprinzip auf die Ressource Fläche übertragen.“ (Difu, 2019).

Tabelle 4

Entwicklung wesentlicher Einflussparameter im Bereich Gebäude in den Green-Szenarien

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
mittleren Sanierungsraten pro Jahr					
2030	2,4 %	1,7 %	2,4 %	2,5 %	2,5 %
2040	3,1 %	1,8 %	3,1 %	3,3 %	3,3 %
2050	3,4 %	1,8 %	3,4 %	3,9 %	3,9 %
von heute bis 2050	2,6 %	1,6 %	2,6 %	2,8 %	2,8 %
mittleren Raumwärmebedarf in kWh/m²					
2030	52,6	61,1	52,6	52,2	52,2
2040	32	48,9	32	30,9	30,9
2050	25,6	42,4	25,6	24,4	24,4
Gebäudeflächen					
bewohnte Wohnfläche pro Person in m²	49,4	53,0	49,4	41,2	
Wohnfläche absolut in 2050 in Mrd. m²	3,55	3,83	3,55	2,96	
Nutzfläche Nichtwohngebäude in 2050 in Mrd. m²			2,54		

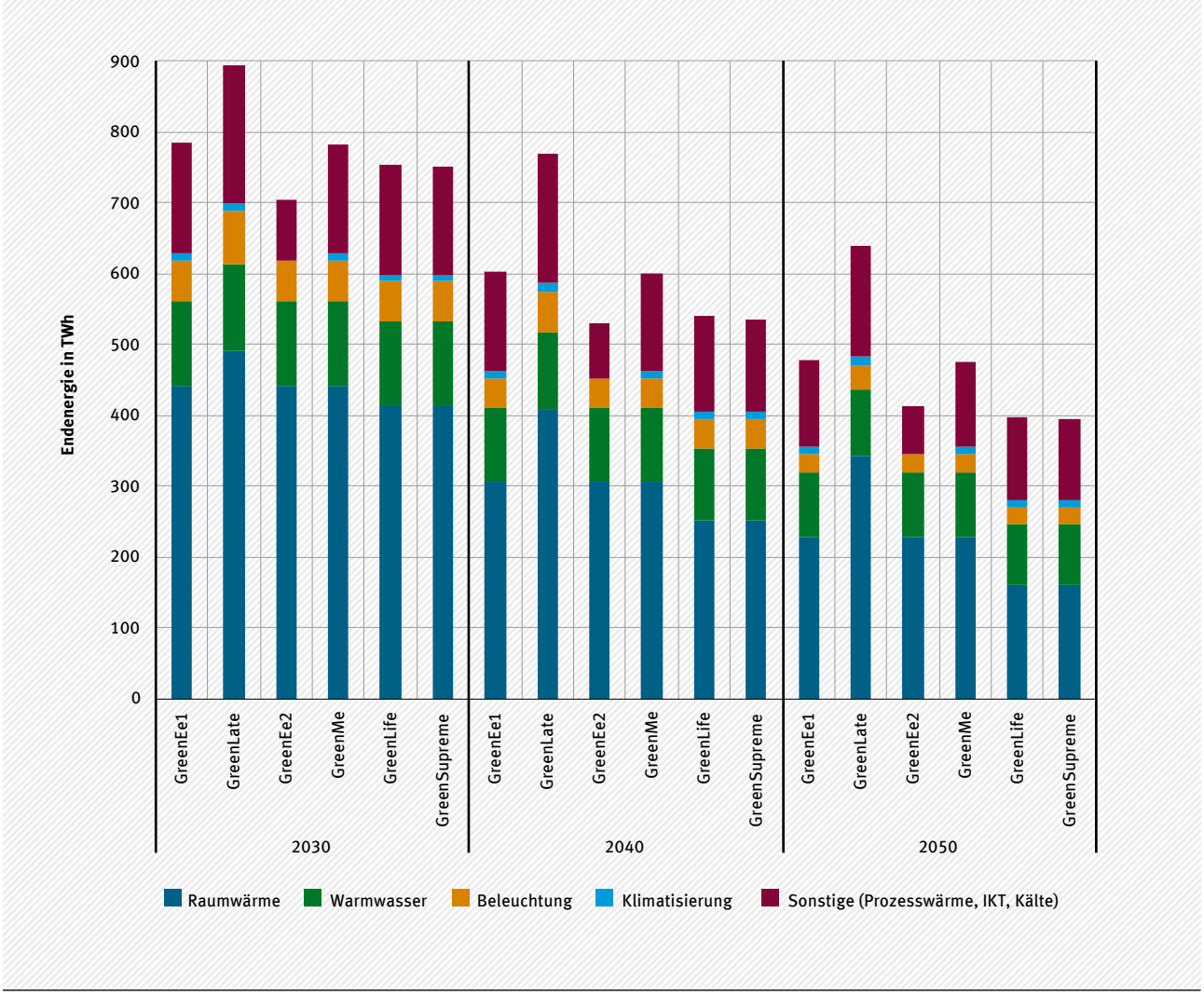
Quelle: UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

längeren Erneuerungs- und Investitionszyklen ist dies jedoch oft eine vertane Chance. Es wird in allen Green-Szenarien unterstellt, dass die ordnungsrechtlichen Rahmenbedingungen und finanziellen Anreizmechanismen so ausgestaltet werden, dass bis spätestens 2030 keine Renovierungen oder Modernisierungen an der Gebäudehülle und Gebäudebauteilen mehr ohne gleichzeitige energetische Sanierung erfolgen. Mit einer Kombination aus ordnungsrechtlichen Maßnahmen, Anreiz- und Förderpolitiken sowie Internalisierung der Klimakosten wird außerdem eine zunehmende Sanierungsaktivität mit einem hohen Ambitionsniveau bei der Sanierungstiefe in allen Green-Szenarien verbunden. Konkret sind die Anstrengungen sowohl beim Niveau der Sanierungsrate als auch beim zeitlichen Verlauf in GreenLife und GreenSupreme entsprechend der Szenariencharakteristik am höchsten. GreenLate liegt deutlich unter diesem Niveau, gleichwohl gegenüber heute eine erhebliche Steigerung zu verzeichnen ist. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind in Tabelle 4 zu sehen.

Der resultierende benötigte Endenergiebedarf in Gebäuden ist in Abbildung 12 dargestellt. Die variierenden unterstellten Maßnahmen in den Green-Szenarien haben direkte Auswirkung auf die verbleibenden Mengen an erneuerbaren Energien, welche im Jahr 2050 noch für die Versorgung des Gebäudebestands bereitgestellt werden müssen. In allen Green-Szenarien werden insbesondere durch Sanierung und Modernisierung Effizienzpotentiale erschlossen und die Bedarfe bis 2050 deutlich reduziert. Wegen des veränderten gesellschaftlichen Anspruchs beim Wohnen, welcher mit einer niedrigeren Wohnfläche pro Person als in GreenEe1 und GreenEe2, GreenMe und GreenLate einhergeht, sinken in GreenLife und GreenSupreme die Bedarfe für Raumwärme stärker. Die Beleuchtung und Prozesswärme in privaten Haushalten können zwar auch Reduktionsbeiträge durch stetige Anpassungen der Ökodesign-Anforderungen, Einsatz energieeffizienter Geräte und Vermeidung von Standby-Betrieb elektrischer Geräte u.ä. leisten. Diese sind jedoch bei weitem nicht so groß.

Abbildung 12

Entwicklung des Endenergiebedarfes (inkl. Umgebungswärme) in Gebäuden in den Green-Szenarien

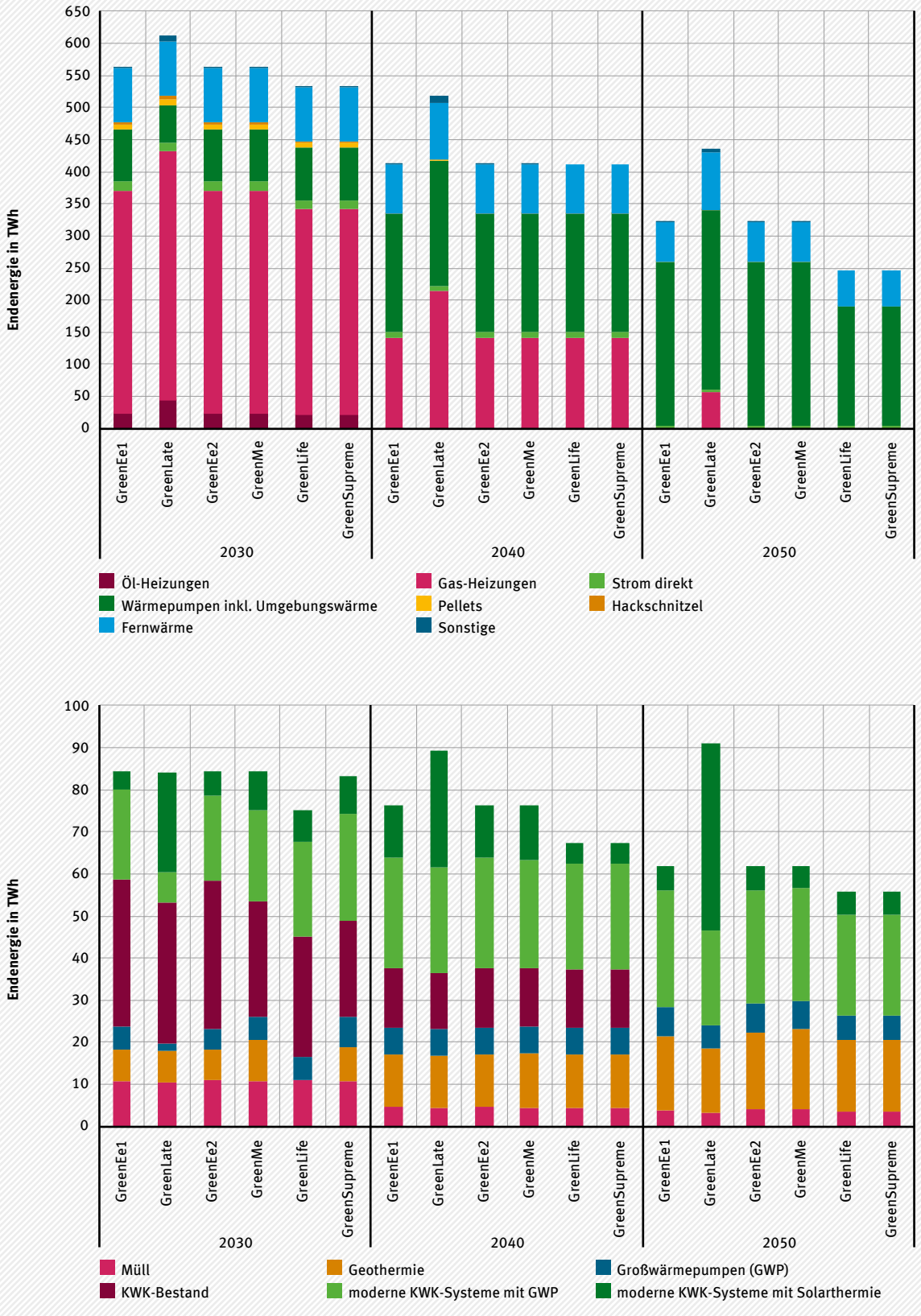


Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

Unter Berücksichtigung einer effizienten Nutzung der Ressourcen, auch der erneuerbaren Energien, schließen die Green-Szenarien außer GreenLate einen Großteil der konventionellen Heiztechniken aus. Vielmehr wird künftig eine Kombination aus Wärmepumpen und Wärmenetzen auf Basis erneuerbaren Energien zur Wärmeversorgung der Gebäude präferiert. Die Entwicklung der Versorgung der Raumwärme- und Warmwasserbedarfe ist in Abbildung 13 oben zu sehen. In allen Green-Szenarien wird vor dem Hintergrund des Umwelt- und Naturschutzes, der Biodiversität und der Erhaltung natürlicher Kohlenstoffspeicher die energetische Nutzung biogener Materialien, wie Pellets, Waldrestholz oder Hackschnitzeln, in dezentralen Heiztechniken sukzessiv reduziert. Es wird unterstellt, dass bereits vor 2030 keine dezentralen Heizungen mit biogenen Brennstoffen mehr errichtet werden. Entsprechend der Szenariencharakteristik erfolgt im Szenario GreenLate ein langsamer Austausch der Heiztechniken, so dass in der Dekade nach 2040 noch zu geringen Anteilen die energetische Nutzung biogener Brennstoffe erfolgt. In den fünf anderen Szenarien sind Biomasseheiztechniken bereits wenige Jahre nach 2030 ersetzt. Weiterhin wird in allen Green-Szenarien unterstellt, dass ab 2020 keine Ölheizungen neu installiert werden. Auch die Installation von Gasheizungen inkl. Brennwertkessel erfolgt in der Dekade nach 2030 nicht mehr. Ausschließlich in GreenLate sind 2050 noch solche Techniken in Betrieb und decken dann auf Basis von erneuerbarem PtG noch 13 % des Raum- und Warmwasserbedarfs.

Abbildung 13

Entwicklung der Endenergie nach Heiztechniken (oben) und Entwicklung der Fernwärmeversorgung (unten)



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

Angesichts der Sanierungen und Modernisierungen der Gebäude verdrängen insbesondere Wärmepumpen die konventionellen Techniken. In den beiden GreenEe-Szenarien basieren 2050 79 % der Raumwärme- und Warmwasserversorgung auf Wärmepumpen. Dominierend sind dabei insbesondere Erdwärmesonden[16], auf denen knapp 50 % der Raumwärmeversorgung in 2050 basiert. In urbanen Räumen dominiert die leitungsgebundene Wärmeversorgung. Es wird unterstellt, dass der Anschlussgrad in vier Szenarien sich deutlich auf mindestens 20 % der Raumwärme- und Warmwasserversorgung erhöht und in GreenLife und GreenSupreme auf rund 24 % der Gebäudewärmeversorgung. Aufgrund der Bedarfsreduktion verringert sich der absolute Wert bis 2050 auf 91 TWh in GreenLate, auf 62 TWh in GreenEe1, GreenEe2 und GreenMe und auf rund 56 TWh in GreenLife und GreenSupreme, siehe Abbildung 13 unten. Die Kraft-Wärme-Kopplungssysteme vollziehen in allen Green-Szenarien einen Wandel. Während in 2030 die leitungsgebundene Wärmeversorgung noch durch den Fortbestand heutiger KWK-Anlagen mit knapp 35 TWh geprägt ist, werden diese in den Folgejahren zunehmend mit innovativen und modernen Kraft-Wärme-Kopplungssystemen ersetzt und verdrängen diese bis 2050 vollständig. Die modernen Kraft-Wärme-Kopplungssysteme zeichnen sich durch einen hohen Anteil erneuerbarer Energie (Großwärmepumpen oder Solarthermie), flexibler gasbasierten KWK-Erzeugung sowie flexiblen Einsatz von Speichern und PtH aus. In GreenSupreme erfolgt dieser Wandel schneller. Die tiefe Geothermie wird stetig ausgebaut, so dass sie 2050 zwischen 26 % und 31 % zur leitungsgebundenen Wärmeversorgung beiträgt. In GreenLate ist der Anteil aufgrund des höheren Wärmebedarfes geringer und beträgt knapp 17 %. Vor dem Hintergrund der veränderten Lebensweise, stärkerer Abfallvermeidung und mit der Bevölkerungsentwicklung einhergehendem rückläufigem Abfallaufkommen sinkt der Energiebeitrag der Abfallverbrennung in allen Szenarien bis 2050 auf rund 6 % und in GreenLate aufgrund des höheren Wärmebedarfes auf nur knapp 4 %.

3.2.2 Entwicklung ausgewählter Rohstoffbedarfe

Die Umsetzung der beschriebenen Modernisierungen und Sanierungen sowie die Umstellung der Wärmebereitstellung auf erneuerbare Energien erfordert zunächst eine erhöhte Rohstoffinanspruchnahme. Doch wird beispielsweise der Bedarf für Dämmmaterialien recht bald durch Einsparungen von Rohstoffen zur Energieversorgung, zunächst fossiler Energieträger und später dann durch Rohstoffe zum Aufbau des erneuerbaren Energiesystems, überkompensiert (UBA, 2018b; Ritthoff et al., 2015). So lässt sich der jährliche kumulierte Rohstoffaufwand für die Wärmeversorgung von Gebäuden gegenüber 2010 mit rund 48,7 Mio. t (UBA, 2018b) um näherungsweise mindestens 70 % in den Green-Szenarien reduzieren, siehe Kapitel 5.3.6 in der RESCUE-Studie (UBA, 2019f).

Die Entwicklungen im Hochbau, der in den Green-Szenarien im Wesentlichen von den Entwicklungen des Wohngebäudebestands geprägt ist, und im Tiefbau, also vor allem für die unterschiedlichen Infrastrukturen wie Verkehrsinfrastruktur (inklusive Brücken, Tunnel u.ä.) und die Ver- und Entsorgungsnetze[17], bestimmen die Entwicklung der benötigten Rohstoffbedarfe. Die Wirkungen der getroffenen Annahmen der einzelnen Green-Szenarien – sowohl zur Entwicklung und Ausgestaltung des Gebäudebestandes als auch der Infrastrukturen in Verbindung mit der Flächenneuinanspruchnahme – werden charakteristisch durch den Bedarf an Bausand, Kies und Schotter (letzte inländische Verwendung) widergespiegelt, siehe Abbildung 14 (S. 40).

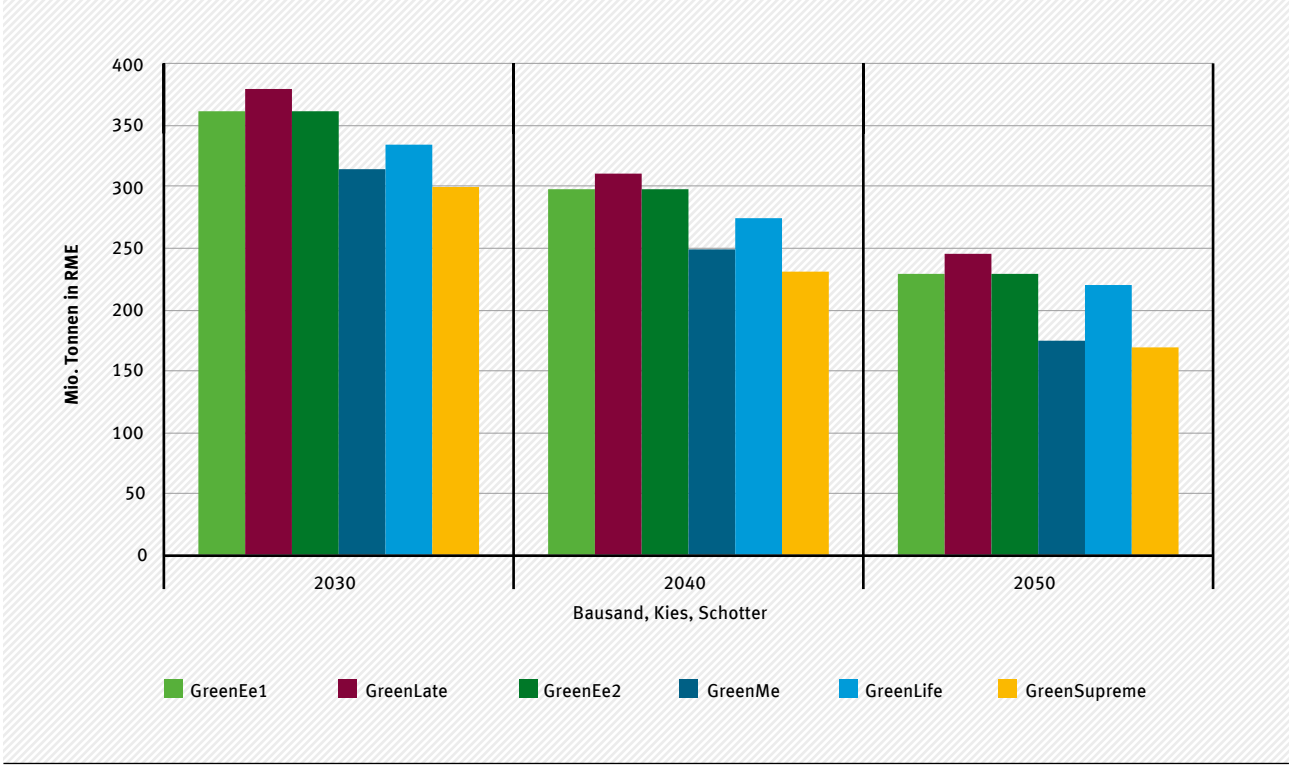
Der deutlich geringere Bedarf an diesen Baustoffen in GreenMe im Vergleich zu den anderen Szenarien, mit Ausnahme von GreenSupreme, lässt sich unter anderem mit dem deutlich erhöhten Anteil von Gebäuden in Holzbauweise erklären. Während in GreenEe1, GreenEe2 und GreenLife unterstellt wird, dass der Holzbauanteil im Wohnungsbau bei Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH) von 15 % in 2010 auf 30 % in 2050 gesteigert werden kann, wird in GreenMe und GreenSupreme der Anteil auf 80 % im Neubau gesteigert. Bei Mehrfamilienhäusern (MFH) steigt der Anteil in diesen beiden Szenarien von 2 % in 2010 auf 45 % in 2050, in den weiteren Szenarien, mit

16 Im Mittel erreichen diese eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4,5. Luft-Wärmepumpen liegen 2050 im Mittel bei JAZ von 4.

17 In der RESCUE-Studie werden in den Rohstoffbetrachtungen auch die Energieerzeugungsanlagen modelltechnisch dem Tiefbau zugeordnet. Art und Umfang sowie die jeweiligen szenariospezifischen Attribute werden in der Langfassung der RESCUE-Studie in Kapitel 5.2 ausführlich dargestellt (UBA, 2019f).

Abbildung 14

Entwicklung der Bedarfe an Bausand, Kies und Schotter (letzte inländische Verwendung) in den Green-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

Ausnahme von GreenLate, lediglich auf 15 % in 2050. In GreenLate bleibt der heutige Anteil an Wohngebäuden in Holzbauweise (EFH 15 % / MFH 2 %) konstant im Neubau erhalten. Weitere Einflussparameter für die reduzierten Bedarfe an Baustoffen sind hier die Substitution von Stahlbeton durch Textilbetone sowie die insgesamt höhere Rohstoffeffizienz von 1,2 % pro Jahr in GreenMe und GreenSupreme. Der geringere Bedarf an Bausand, Kies und Schotter in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2 resultiert zu großen Teilen aus der angenommenen geringeren Wohnfläche sowie der unterstellten Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme. Green Supreme weist den geringsten Bedarf der genannten Baustoffe auf, da sich hier die Effekte aus GreenMe und GreenLife ergänzen.

3.2.3 Schlussfolgerungen

Energieeffizienz und Substitution der fossilen Energieträger sind die Schlüsselelemente für erfolgreichen Klimaschutz im Gebäudesektor. In Kombination mit Maßnahmen des nachhaltigen und rohstoffsparenden Bauens sowie weniger Flächenneuinanspruchnahme kann eine ressourceneffiziente, treibhausgasneutrale Transformation gelingen. Aufgrund der langen Investitionszyklen besteht beim Bauen und Wohnen dringender Handlungsbedarf. Daher müssen schon heute die Anforderungen des Gebäudebestands im Jahr 2050 bei Neubau, Sanierungen und Modernisierungen weitestgehend erfüllt werden. Dabei wird der zeitweise erhöhte Rohstoffbedarf für Dämmmaterialien durch Einsparungen der Energiebereitstellung überkompensiert. Bei der aktuellen Wärmeversorgung wird der Bedarf fossiler Energieträger direkt vermindert. Später werden aufgrund des geringeren Energiebedarfs indirekt Rohstoffe zum Ausbau des erneuerbaren Energiesystems eingespart. Genauere Ausführungen und Herleitungen sind in Kapitel 5.3 der RESCUE-Studie zu finden (UBA, 2019f). Zur Umsetzung sind folgende Schritte erforderlich:

- Die Sanierungsrate ist kurzfristig auf mindestens das Zweieinhalbfache des heutigen Niveaus von 1 % zu erhöhen. Derart große Steigerungen sind nur zu erreichen, wenn zeitnah sehr wirksame politische Instrumente etabliert werden.

- Maßnahmen und Instrumente sind so auszugestalten oder zu flankieren, dass sie die Sanierungen sowohl wirtschaftlich attraktiv als auch sozialverträglich machen und ausreichend geschulte Fachkräfte zur Umsetzung verfügbar sind.

Alle Energiemengen, die trotz ambitionierter Energieeffizienzmaßnahmen für den Gebäudebestand noch erforderlich sind, müssen im Jahr 2050 mit erneuerbaren Energien bereitgestellt werden. Der vollständige Verzicht auf fossile Energieträger ist auch in diesem Bereich oberste Prämisse. Um erfolgreich einen energetisch und rohstofflich effizienten Fuel-Switch zu ermöglichen, sind folgende Schritte erforderlich:

- Schnelles Handeln zur Reduktion des Raumwärmebedarfes, wie oben beschrieben, hebt Synergien zur Integration besonders effizienter klimafreundlicher Techniken zur Wärmeversorgung, wie Wärmepumpen, und im urbanen Raum zur Integration von leitungsgebundener Wärmeversorgung mit erneuerbaren Energien.

- Jegliche Förderungen von Heiztechniken, die auf fossilen Brennstoffen basieren, müssen umgehend beendet werden.

- Zeitnah sollten keine neuen Ölheizungen und in der Dekade nach 2030 auch keine neuen Gasheizungen mehr installiert werden.

- Flankierend sind besonders effiziente, dezentrale Heiztechniken wie Wärmepumpen zu fördern.

- Die Auswirkungen infolge verzögertem oder weniger ambitioniertem Handeln bei den Sanierungen und Modernisierungen wie im Szenario GreenLate, führen zu höheren Endenergiebedarfen und verzögertem Austausch der Heiztechniken. Mit der Nutzung von PtG ist zwar eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung möglich. Diese geht jedoch mit geringeren Effizienzen, höheren Betriebskosten, höheren volkswirtschaftlichen Kosten (ifeu et al., 2018) sowie höheren Energie- und Rohstoffbedarfen in der Energieversorgung einher. Ein Festhalten an konventionellen Techniken erscheint daher nicht zielorientiert.

- Die nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse ist begrenzt. Aus Gründen der Ressourcenschonung sollte die Nutzung von Holz vor allem stofflich erfolgen und erst am Ende einer Kaskade energetisch. Dezentrale Biomassenutzung sollte schrittweise vermieden werden, da hiermit meist hohe lokale Emissionen von Feinstaub und anderen Luftschadstoffen einhergehen.

- In urbanen Räumen ist die leitungsgebundene Wärmeversorgung wirtschaftlich attraktiv und treibhausgasneutral zu gestalten. Zukunftsfähig sind moderne und flexible Strom-Wärme-Systeme, bspw. in Kombination mit Großwärmepumpen.

- Die finanzielle Förderung der Wärmenetze ist heute über das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) noch sehr stark an die fossilbefeuerte KWK gebunden. Die Förderung leitungsgebundener Wärmeinfrastruktur muss stattdessen in Zukunft an der Einbindung von Wärme aus erneuerbaren Energien ausgerichtet sein.

Vor dem Hintergrund der derzeitigen Diskussionen zum Wohnraumbedarf und zu Mietsteigerungen in Wachstumsregionen sehen die Szenarien, insbesondere GreenLife und GreenSupreme, eine sehr ambitionierte und diskussionswürdige Entwicklung des Wohngebäudebestandes und der Wohnfläche vor. Diese zeigen aber auch, dass trotz eines zunächst weiter wachsenden Wohngebäudebestands Art und Umfang künftiger Bauaktivitäten eine hohe Relevanz für die Reduktion des Rohstoffbedarfs aufweisen. So reduzieren Materialsubstitutionen, beispielsweise durch verstärkten Holzbau, neben dem verstärkten Einsatz von Sekundärmaterial den Rohstoffkonsum deutlich. Auch die Reduktion der Wohnfläche pro Kopf stellt eine wichtige Stellschraube dar.

- Der hochwertige Einsatz von Recyclingbaustoffen insbesondere im Hochbau ist konsequent zu fördern, bestehende Hemmnisse sind zu beseitigen und die entsprechenden gesetzlichen Voraussetzungen zu schaffen. Zudem gilt es, die entsprechende Forschungsförderung fortzuführen.

- Der verstärkte Holzbau, insbesondere im mehrgeschossigen Wohnungsbau, verspricht positive Effekte für den Klima- und Ressourcenschutz. Die Bundesregierung muss ihre Forschungs- und Beratungsaktivitäten zum Holzbau, u.a. im Rahmen der Charta für Holz 2.0, fortführen. Hierbei gilt es aber verstärkt, mögliche negative ökologische Wirkungen im Blick zu behalten. Insbesondere

bestehen Unklarheiten bezüglich der Holzverfügbarkeiten vor dem Hintergrund des notwendigen Waldumbaus und den Effekten der Verschiebungen zwischen Wald- und Holzproduktspeicher für den Klimaschutz.

- Flächensparendes Bauen, Innenentwicklung sowie Flächenrecycling reduzieren die Flächenneuinanspruchnahme, steigern die Effizienz der Flächennutzung und sind entsprechend zu fordern und zu fördern. Dies gilt auch und insbesondere in kleineren Städten und ländlichen Gemeinden, in denen die Flächenneuinanspruchnahme bezogen auf die Zahl der Einwohner höher ist als in den großen Städten.

3.3 Mobilität

Der Verkehr hat in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten stetig zugenommen. Auch zukünftig wird ein weiterer starker Zuwachs prognostiziert, vor allem beim Güterverkehr. Mit Stand 2017 verzeichnete der Verkehr mit 168 Mio. t $CO_{2Äq}$ als einziger Sektor höhere THG-Emissionen als 1990. Damit verursachte der Verkehr im Jahr 2017 rund 18,5 % der THG-Emissionen Deutschlands – Tendenz steigend. Die Umstellung des Verkehrs hin zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Verkehr ist somit zwingend und kann erfolgreich gelingen, wenn

- eine **Verkehrswende** mit dem Ziel der Reduzierung der Verkehrsleistung und des Endenergieverbrauches mit

- einer **Energiewende im Verkehr**, d.h. der Umstellung auf alternative Antriebe und THG neutrale Kraftstoffe kombiniert wird.

Maßnahmen der Verkehrswende umfassen die Bereiche Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz. Nur mittels eines integrierten Ansatzes und einem Mix von Maßnahmen kann das Ziel eines nachhaltigen Verkehrs erreicht werden. Dabei kommt es vor allem auf sogenannte nicht-technische Maßnahmen an, wie z.B. ökonomische Instrumente oder eine integrierte Siedlungs- und Verkehrsplanung. Mit Blick auf Rohstoffbedarf, Umwelt¬wirkungen und Kosten ist bis spätestens 2050 eine deutliche Senkung des Energieverbrauchs um 40 % bis 60 % zwingend erforderlich. Zugleich sinkt dadurch der Bedarf an erforderlichen erneuerbaren Energien im Verkehr und die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende wird so erst wahrscheinlich.[18] Eine Verkehrswende allein reicht jedoch nicht aus. Als weiterer Baustein müssen die energiebedingten Treibhausgasemissionen im Verkehr vollständig durch eine Energiewende mit vollständiger Umstellung auf THG-neutrale Energieträger vermieden werden.

In der Energiewende im Verkehr sind Verbrennungsmotoren, soweit technisch möglich, durch elektrische Antriebe zu ersetzen und fossile Kraftstoffe schrittweise durch THG-neutrale zu ersetzen. Aufgrund von Vorteilen der Elektrifizierung bei Energie- und Kosteneffizienz (UBA, 2016a) ist es sinnvoll, die Elektrifizierung möglichst weitgehend zu realisieren, bevor für weitere THG Minderungen die aufwändigere Umstellung auf THG-neutrale Kraftstoffe (vor allem auf Power-to-Liquid (PtL)) erfolgt[19]. Vor dem Hintergrund der langfristig benötigten hohen Bedarfe an THG-neutralen, flüssigen Kraftstoffen erfolgt der Einstieg in PtX-Kraftstoffe daher dennoch gleichzeitig mit der Elektrifizierung der Verkehrsmittel. Weiterhin gibt es Bereiche des Verkehrs, die auch künftig nicht oder nur teilweise elektrifiziert werden können, wie etwa der internationale See- und Luftverkehr (UBA, 2015). Hier spielen THG-neutrale Kraftstoffe die zentrale Rolle (UBA, 2015; UBA, 2016a). Um die erforderlichen Treibhausgasminderungen zu ermöglichen, ist ein entsprechendes Voranschreiten im Bereich der Energieversorgung erforderlich, siehe Kapitel 3.1

In allen Green-Szenarien wird eine Entwicklung des Verkehrs aufgezeigt, in der die beiden obenstehenden Minderungsansätze (Verkehrs- und Energiewende) in unterschiedlich starker Ausprägung verfolgt werden. Gemein haben die Szenarien, dass bis zum Jahr 2050 die energiebedingten THG-Emissionen des Verkehrs vollständig vermieden werden. Entsprechend der Szenariencharakteristik, siehe Tabelle 5, wird beispielsweise durch die Änderung des Mobilitätsverhaltens, einer Verkehrsverlagerung im Güterverkehr auf klimafreundliche Verkehrsmittel und Effizienzverbesserungen bei Fahrzeugen ein großer Beitrag zur THG-Minderung im Verkehr geleistet. In allen Green-Szenarien kommt es zu einer relativ starken Umstellung auf elektrische Antriebe. Im Güterverkehr

18 Die internationale Luft- und Seeschifffahrt werden in den Szenarien mitbetrachtet, jedoch werden deren THG-Emissionen nicht den nationalen Inventaren zur Berichterstattung zugerechnet.

19 Biogene Kraftstoffe können aufgrund begrenzter Mengenpotentiale, bestehender Nutzungskonkurrenzen, fehlender vollständiger THG-Neutralität und Verwendungsalternativen nur gering beitragen.

Tabelle 5

Charakteristik der Green-Szenarien im Bereich Verkehr

	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Änderung des persönlichen Mobilitätsverhaltens*	hoch	mittel	hoch		sehr hoch	
Verkehrsverlagerung im Güterverkehr	sehr hoch	hoch	sehr hoch			
Effizienzverbesserung bei Fahrzeugen	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
Umstellung auf elektrische Antriebe	hoch	mittel	hoch			sehr hoch

* Durch Wahl des Verkehrsmittels, der Fahrzeuggröße sowie des Wohn- und Arbeitsorts.

erfolgt dies, abgesehen von GreenLate, auch durch Oberleitungshybrid-Lkw (OH-Lkw), teilweise als rein elektrische Lkw mit Oberleitungsladung (bev-OH-Lkw). Um die energiebedingten THG-Emissionen vollständig zu vermeiden, werden bis 2050 treibhausgasneutrale Kraftstoffe integriert, hauptsächlich PtL. Hervorzuheben sind weiterhin in einigen Green-Szenarien Änderungen des Nutzungsverhaltes im Luftverkehr, die insgesamt zu weniger Flugreisen führen. Innerdeutsche Flüge werden in diesen Szenarien komplett auf den Landverkehr verlagert.

3.3.1 Entwicklung des Verkehrs

Die Entwicklung der gesamten Verkehrsleistung von Personen und Gütern ist ein maßgeblicher Treiber für die THG-Emissionen des Verkehrs. Wichtig ist auch die Verteilung auf die verschiedenen Verkehrsmittel. In den Green-Szenarien kommt es im Personenverkehr generell zu einer deutlichen Änderung des Mobilitätsverhaltens der Bevölkerung.

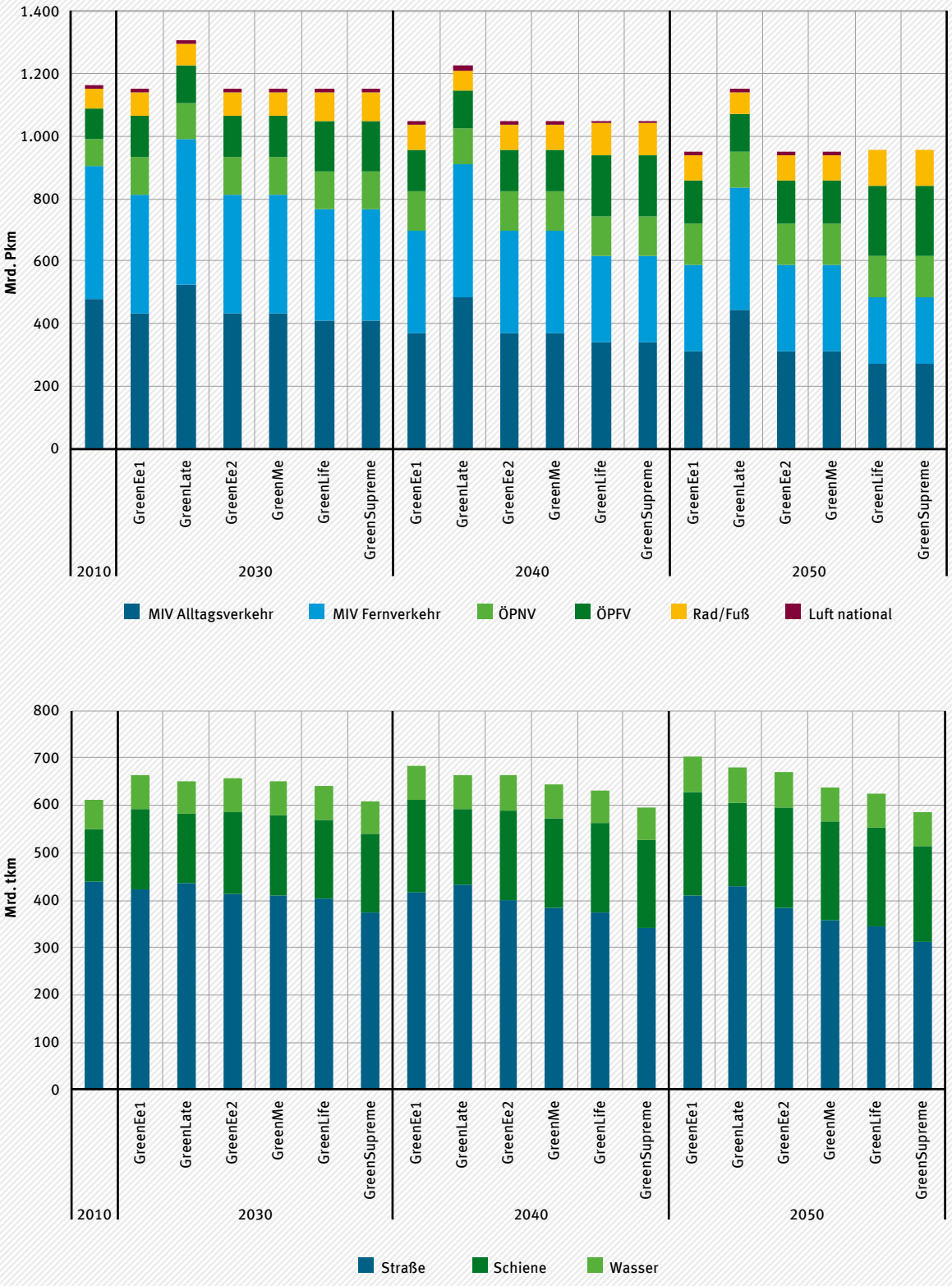
In GreenLife und GreenSupreme werden – über die anderen Szenarien hinaus – durch eine „Stadt und Region der kurzen Wege“ bei der urbanen Bevölkerung weitere Änderungen umgesetzt. Car- und Ridesharing sowie eine Stärkung des ÖPNV prägen damit zusätzlich die Entwicklungen. In der Folge gibt es bis zum Jahr 2050 in den Städten keinen signifikanten Pkw Besitz mehr. Die Anzahl der Pkw geht inklusive Ridesharing- sowie Carsharing-Pkw und Taxis auf 150 Fahrzeuge pro 1.000 Einwohner (UBA, 2017a) und damit um ca. zwei Drittel zurück. Für weitere Strecken nutzt die urbane Bevölkerung viel stärker als heute Bahn und Fernbus. Im Zusammenspiel aus der Verkürzung von Wegen durch Siedlungsverdichtung und geänderte Verkehrsmittelwahl kommt es bis zum Jahr 2050 zu einer Abnahme des Anteils des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und auch der Personenverkehrsleistung insgesamt.

Die entsprechend der Szenariocharakteristik verzögerte Trendwende in GreenLate führt hingegen dazu, dass der MIV-Anteil größer bleibt und auch insgesamt die Verkehrsleistung höher liegt als in den anderen Szenarien.

Die Entwicklung des Güterverkehrs spiegelt die Änderungen der Wirtschaftsentwicklung und Produktionsstrukturen in Deutschland und die damit verbundenen Änderungen der Gütertransportnachfrage wider. Die Transportnachfrage und deren Entwicklung beeinflussen unter anderem die Entwicklung der Verkehrsleistung im Güterverkehr. So gibt es Trends, die außerhalb des Verkehrs liegen, jedoch Auswirkungen auf die Güterverkehrsleistung haben. Dies sind beispielsweise die sich verringernde Bedarfe an fossilen Energieträgern und ein gesteigertes Recycling von Materialien. In allen Szenarien außer GreenSupreme liegt die Gesamtverkehrsleistung des Güterverkehrs im Jahr 2050 über dem Wert von 2010, was seine Ursache auch in der Verlagerung auf Binnenschiff und Schiene und damit längeren Transportstrecken hat. Die Verkehrsleistung auf der Straße sinkt jedoch in allen Szenarien bis zum Jahr 2050 unter das Niveau des Jahres 2010. Die Verlagerung von Gütern von der Straße auf Schiene und Binnenschiff wird bis zum Jahr 2050 stark forciert, so dass in allen Szenarien außer GreenLate mehr als 42 % der Güter

Abbildung 15

Entwicklung der Personenverkehrsleistung (oben) und Güterverkehrsleistung (unten)



Quelle: eigene Abbildung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

klimafreundlich transportiert werden. Heute sind dies nur rund 28 %. In GreenLate steigt der Anteil bis zum Jahr 2050 zumindest auf 37 %.

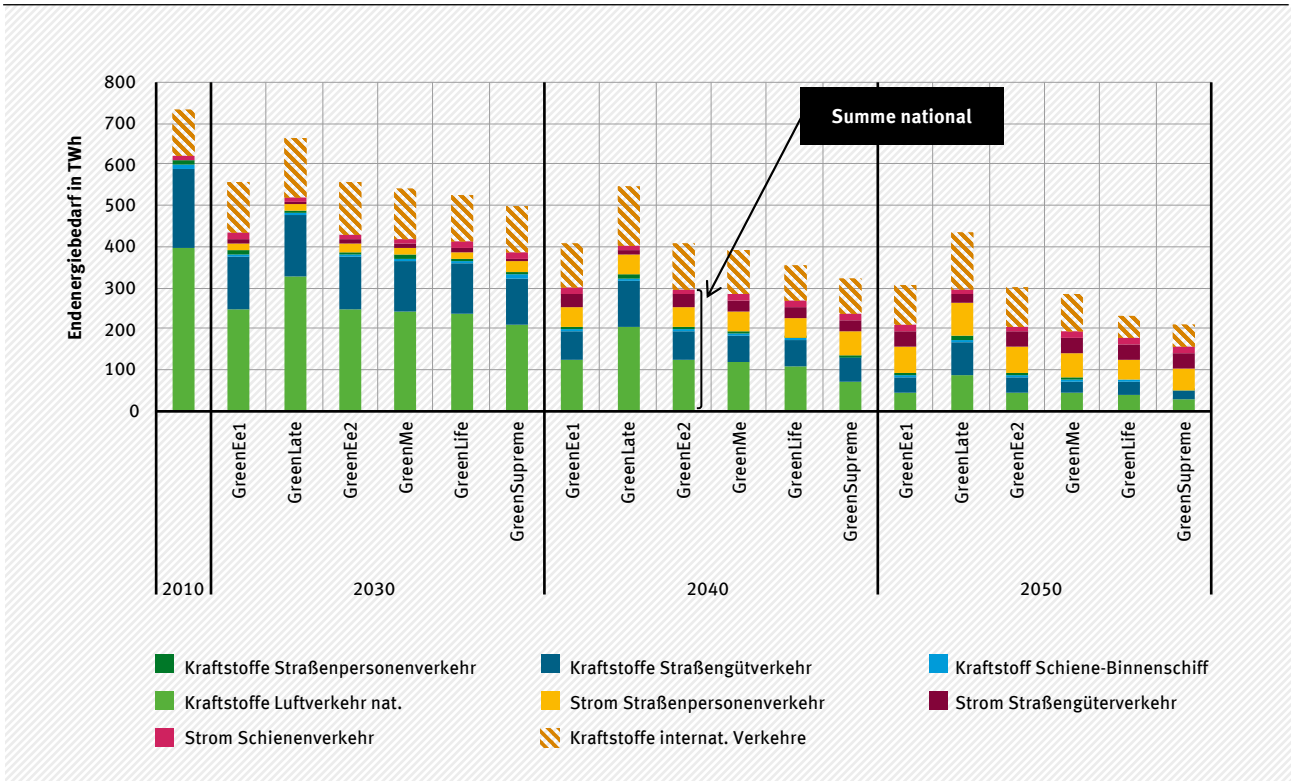
Die Erfolge der Verkehrswende im Personen- und Güterverkehr spiegeln sich auch im Endenergieverbrauch wider (siehe Abbildung 16). Besonders zeigen sich hierbei die Erfolge der Effizienzverbesserung der Fahr- und Flugzeuge sowie Schiffe, die in allen Green Szenarien mit unterschiedlichem Fortschritt erfolgen. Noch wichtiger ist die Elektrifizierung, vor allem im Bereich des Landverkehrs. Während im Jahr 2010 im Straßenpersonen- und Güterverkehr nahezu kein Strom eingesetzt wird, steigt der Anteil bis zum Jahr 2050 stark an. Abgesehen vom Szenario GreenLate ist Strom sowohl im nationalen Personen- als auch im Güterverkehr mit 56 % bis 67 % die am stärksten genutzte Endenergiequelle. Mit einer Kilowattstunde Strom ist auch die Erbringung einer ca. drei Mal so großen Verkehrsleistung möglich wie bei der Nutzung von PtL. Strom dominiert den Verkehr daher noch deutlicher als hier auf den ersten Blick sichtbar. Der Bedarf an Kraftstoffen geht in allen Szenarien mit mindestens 85 % deutlich zurück.

Damit Strom eine solch maßgebliche Rolle zur Energieversorgung des Verkehrs spielen kann, ist die Energiewende rechtzeitig einzuleiten. Elektrofahrzeuge müssen sich als Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren möglichst schnell und stärker als bisher im Markt etablieren. Im Pkw-Bereich heißt dies, dass schon im Jahr 2030, abgesehen von GreenLate, mindestens 40 % der neuen Pkw Elektrofahrzeuge sind (als reine batterie-elektrischen Pkw oder Plug-in-Hybride).

Ab 2040 werden in den Szenarien außer GreenLate nur noch Elektro Pkw neu zugelassen, in GreenLife und GreenSupreme teilweise als Car- und Ridesharing-Fahrzeuge. In GreenLate erfolgt der Markthochlauf um 5 bis 10 Jahre verzögert, in GreenSupreme deutlich schneller als in allen anderen Szenarien, so dass im Jahr 2030 schon rund 12 Mio. E-Pkw im Bestand sind. Auch bei Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis zu 12 Tonnen setzen sich elektrische Antriebe analog zum Pkw-Bereich durch. Bei schwereren Lkw und Sattelzugmaschinen erfolgt die Umstellung auf elektrische Antriebe zuerst langsamer als bei Pkw, bis zum Jahr 2030 vor allem

Abbildung 16

Entwicklung des Endenergieverbrauchs im Verkehr



Quelle: eigene Abbildung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

durch Plug-in-Hybrid-Lkw. Ab dem Jahr 2040 werden abgesehen von GreenLate dann jedoch auch nur noch elektrische Lkw neu zugelassen – vor allem in Form von OH- und bevOH-Lkw. In GreenLate gibt es nur Elektro-Lkw, die keine Oberleitung nutzen, da sich die OH-Varianten in diesem Szenario nicht durchsetzen und eine Oberleitungsinfrastruktur daher nicht existiert.

Betrachtet man die verschiedenen Verkehrsmittel, so können die größten Minderungen des Endenergieverbrauches im motorisierten Individualverkehr erreicht werden. Gründe dafür sind insbesondere die starke Elektrifizierung im Pkw-Verkehr sowie die Wirkung der Maßnahmen zur Vermeidung und Verlagerung von Personenverkehr. Im Straßengüterverkehr können die Verkehrsleistungen zwischen 2010 und 2050 nicht in gleichem Maße reduziert werden. Der Wandel zu elektrischen Antrieben muss dafür jedoch in beiden Bereichen frühzeitig, also deutlich vor 2030 eingeleitet werden.

Aufgrund hoher Wachstumsraten der Verkehrsleistung nimmt der Anteil des Luftverkehrs am Endenergieverbrauch des Gesamtverkehrs in einigen Green-Szenarien deutlich zu. Aufgrund der nur in GreenLife und GreenSupreme erreichten Änderungen des Nutzungsverhaltes im Luftverkehr und der unterschiedlichen Ausprägungen zur Effizienzverbesserung gibt es zwischen den Green-Szenarien große Unterschiede, die sich auf den Bedarf an PtL-Kraftstoffen auswirken. Der Luftverkehr dominiert den Endenergieverbrauch der internationalen Verkehrsmittel in allen Szenarien, selbst unter Änderung des Nutzungsverhaltens, bis 2050. Als Energieträger werden im internationalem See- und Luftverkehr auch im Jahr 2050 ausschließlich Kraftstoffe und kein Strom genutzt. Schienenverkehr und Binnenschifffahrt tragen trotz ihrem deutlichen Beitrag zur Verkehrsleistung auf Grund der hohen Energieeffizienz pro Tonnenkilometer eher gering zum Endenergieverbrauch bei.

In allen Szenarien werden die Kraftstoffe im Jahr 2050 auf Basis erneuerbaren Stromes hergestellt. Sie werden damit THG neutral produziert, so dass die im Verkehr notwendigen THG Minderungen trotz Verwendung von Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren erreicht werden können. Damit dies im Flugverkehr gelingen kann, ist die steuerliche Begünstigung des Luftverkehrs abzubauen, wie die Befreiung von der Kerosinsteuer sowie die Befreiung der Mehrwertsteuer für grenzüberschreitende Flüge. Darüber hinaus müssen für die Integration von erneuerbaren strombasierten Treibstoffen die ordnungsrechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen geschaffen werden. In der UBA-Studie (UBA, 2019j) wird hierfür konzeptionell eine CO_2-Bepreisung von Kerosin über den europäischen Emissionshandel flankiert mit ordnungspolitischen Maßnahmen wie eine PtL-Beimischquote vorgeschlagen.

In Abbildung 17 ist der Beitrag der Verkehrs- und Energiewende – aufgeteilt in Elektrifizierung und PtL-Kraftstoffe – zur THG-Minderung im Jahr 2050 gegenüber 2010 dargestellt. Eine verzögerte Umsetzung der Verkehrswende führt vor allem zu einer deutlich größeren Nachfrage nach PtL Kraftstoffen, um die THG-Neutralität des Verkehrs im Jahr 2050 zu erreichen.[20]

Die Ausgestaltung der Szenarien führt im Zeitverlauf zu sich erheblich verändernden Rohstoffbedarfen. Vor allem der Trend zur Elektrifizierung der Verkehrsmittel, hier in erster Linie als batterie elektrische Mobilität, führt zu massiven Veränderungen hinsichtlich

20 Neben dem Zielpunkt im Jahr 2050 sind jedoch insbesondere auch die Energiebedarfe und THG Emissionen im Verlauf bis 2050 entscheidend.

Tabelle 6

Anzahl der Elektro-Pkw im Bestand für das Jahr 2030

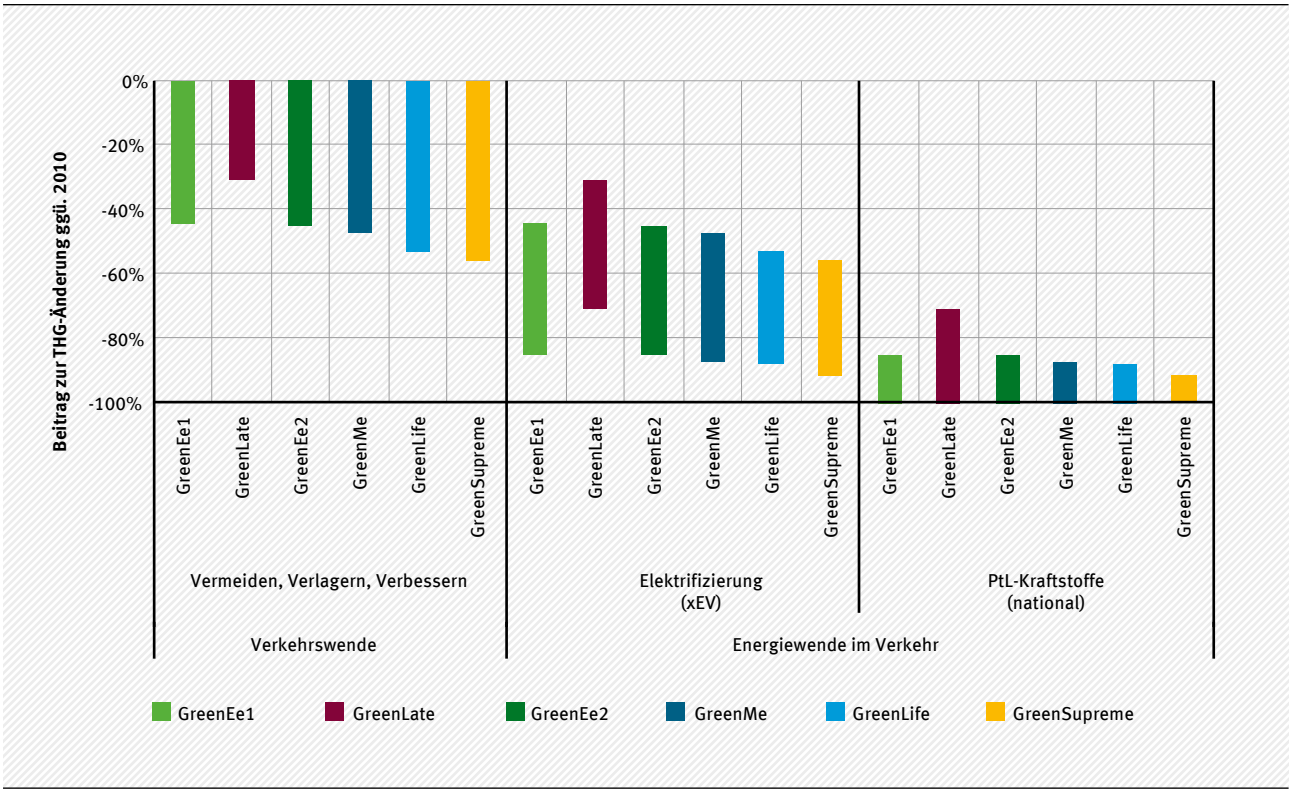
in Mio. Pkw	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Plug-in-Hybride (PHEV)	3,1	2,5	3,1		3,0	4,7
Batterie-elektrisch (BEV)	4,5	2,3	4,5		4,4	7,3
Gesamtzahl	**7,5**	**4,8**	**7,5**		**7,5***	**12,1***

* In GreenLife und GreenSupreme ist der Bestand kleiner und daher auch die Anzahl der E-Pkw bei gleichen Anteil geringer.

Quelle: auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

Abbildung 17

Beiträge der Verkehrswende und der Energiewende im nationalen Verkehr zum Klimaschutz (Änderung zum Niveau im Jahr 2050 gegenüber 2010)



Quelle: eigene Abbildung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e mit eigenen Abschätzungen auf Basis der „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“ (UBA, 2016a). Die Beiträge wurden in der Reihenfolge von links nach rechts bestimmt. Würde man zuerst die Elektrifizierung anwenden und anschließend die Verkehrswende, würde erstere stärker mindern und letztere geringer. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich für die erneuerbaren PtL Kraftstoffe aufgrund der gewählten Darstellung.

Art und Menge der nachgefragten Rohstoffe. Weitere Trends sind der Leichtbau von Fahrzeugen, technische Effizienzsteigerungen an Fahrzeugen und der Einsatz anderer Kraft- und Treibstoffe.

Die Integration der Elektromobilität erfolgt in den Green-Szenarien unterschiedlich schnell[21]. Darüber hinaus erfolgt bis 2050 ein Wechsel der Zelltypen von den zunächst dominierenden Lithium-Ionen-Akkus hin zu Lithium-Schwefel-Akkus mit rund doppelt so hoher Energiedichte. Auch hierdurch verändert sich der Bedarf an Materialien[22] und es wird insgesamt weniger Material und damit Batteriegewicht erforderlich, siehe Abbildung 18. In GreenMe und GreenSupreme wird letzteres unterstützt durch ein enges Netz an Schnellladesäulen, so dass Akkus mit geringeren Reichweiten und damit geringerem Materialbedarf ausreichen.

Damit gehen die Bedarfe an Kobalt und Graphit für Fahrzeugbatterien bis 2050 auf null zurück, da beide Stoffe in den Lithium Schwefel Akkus nicht mehr zum Einsatz kommen. Auch der 2050 geringere Gesamtbedarf an Lithium, außer in GreenLate, ist teils auf den Wechsel der Zelltypen zurückzuführen.

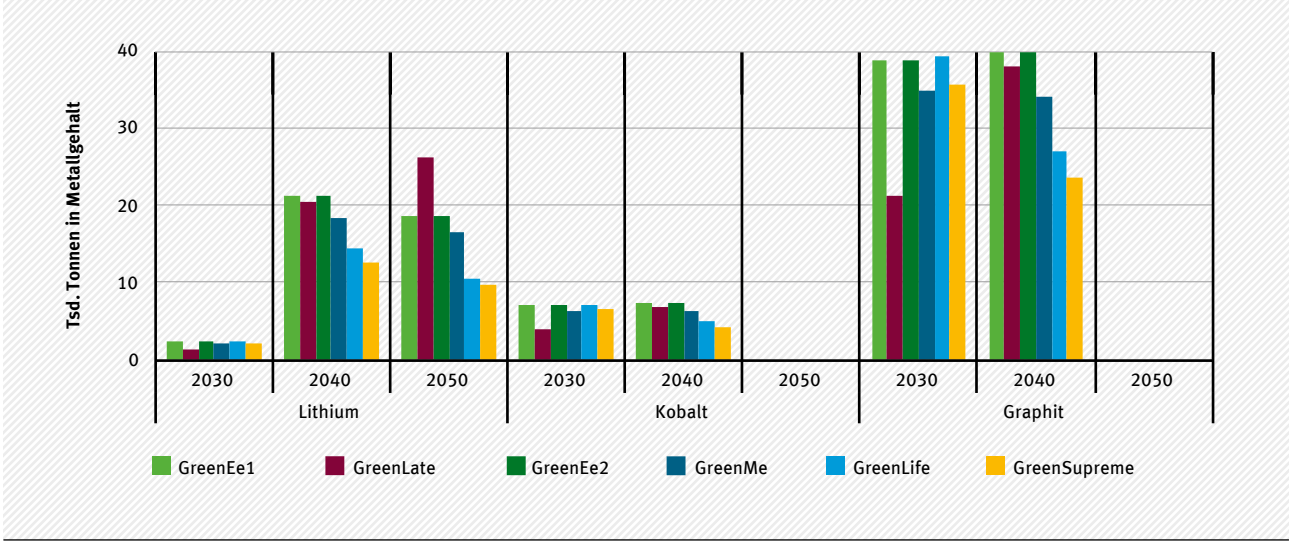
Markthochlauf und Bestand an Elektrofahrzeugen wirken sich ebenfalls auf den Bedarf an Lithium aus. Während in 2030 GreenLate noch den geringsten Bedarf aller Szenarien aufweist, liegt er 2050 fast dreifach über dem Bedarf von GreenSupreme. Die geringe absolute Anzahl an Elektrofahrzeugen in GreenLife und GreenSupreme führt ab 2040 zum geringsten Bedarf an Batterierohstoffen. Neben den hier dargestellten Rohstoffen Lithium, Kobalt und Graphit erhöht sich durch die Elektromobilität auch der Bedarf an weiteren Metallen, insbesondere Kupfer.

21 Im Folgenden ist die Fahrzeugbatterie thematisiert, nicht der Antriebsstrang der (Elektro-)Fahrzeuge.

22 Li-Ion-Akkus haben im Vergleich zu Li-S-Akkus höhere Anteile an Metallen und Lithium-Verbindungen.

Abbildung 18

Bedarf an für Akkumulatoren relevanten Rohstoffen in den Green-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

In den Rohstoffbetrachtungen der Green-Szenarien wurde kein explizites Recycling der Fahrzeugbatterien unterstellt, sondern diese werden einer Second-Life-Nutzung im Energiesystem zugeführt. Aktuell sind Recylingkonzepte in der Entwicklung. Abschätzungen zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen können jedoch noch nicht getroffen werden. Mit der erwarteten Marktreife in den nächsten Jahren kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf, insbesondere bei einer ambitionierten Transformation wie in GreenLife oder GreenSupreme, auch durch Sekundärmaterialien gedeckt werden kann.

3.3.2 Schlussfolgerungen

Der Schlüssel zu einer aus volkswirtschaftlicher Sicht effektiven Gestaltung eines THG neutralen und ressourcenschonenden Verkehrs liegt in einer Kombination aus Verkehrswende sowie einer Energiewende im Verkehr. Zu ihrer Umsetzung sind folgende Schritte möglichst schnell erforderlich:

- Verkehrsvermeidung und die Verlagerung auf den Umweltverbund spielen im Personen-verkehr eine zentrale Rolle. Um dies zu erreichen, sind einerseits eine CO_2-Bepreisung auf fossile Kraftstoffe einzuführen und umweltschädliche Subventionen abzubauen (z.B. Dieselsteuer- und Dienstwagenprivileg, Pendlerpauschale), andererseits Anreize zu schaffen, Wegstrecken zu reduzieren und mehr Wege mit dem Umweltverbund zurücklegen zu können.
- Eine Verkehrsverlagerung im Güterverkehr auf Schiene und Binnenschiff sollte gefördert werden, indem einerseits die Attraktivität der Alternativen zur Straße erhöht, andererseits der Güterverkehr auf der Straße durch eine Anlastung der Umweltkosten verteuert wird. Zusätzlich ist durch eine nachhaltige und klimaverträgliche Wirtschaftsentwicklung das Wachstum des Verkehrsaufkommens zu reduzieren bzw. das Aufkommen insgesamt zu senken.
- Als Teil der Verkehrswende sind konventionelle Fahrzeuge, Flugzeuge und Schiffe kraftstoffeffizienter auszulegen. Insbesondere bei Schiffen und Flugzeugen, die auch langfristig Kraftstoffe nutzen, ist dies besonders wichtig.
- Der Kerosinbedarf für die von Deutschland abgehenden internationalen Flüge und die damit zusammenhängenden THG-Emissionen werden künftig weiter stark steigen, falls der Luftverkehr nicht zügig auf erneuerbare PtL-Kraftstoffe umgestellt wird. Ergänzend erforderlich ist der Ausbau des Schienennetzes, um die Erreichbarkeit der Ballungszentren zu verbessern und innerdeutsche Flüge zu vermeiden.
- Elektromobilität ist der zentrale Baustein einer Energiewende im Verkehr. Nur in Verkehrsträgern, wo nach heutigem Kenntnisstand die direkte Nutzung bzw. die ausschließliche Nutzung von

erneuerbaren Strom zur Deckung der Mobilitätsbedarfe technisch nicht möglich ist, sollten treibhausgasneutrale Kraftstoffe zum Einsatz kommen. Für hohe Minderungen der THG-Emissionen im Personenverkehr ist ein sehr schneller Markthochlauf von E-Pkw notwendig. Zur effizienten Erreichung der Klimaziele sollten spätestens ab 2040 nur noch E Pkw neu zugelassen werden.

- Im Güterverkehr sind für LNF und Lkw bis 12 Tonnen zGG, batterie-elektrische Antriebe schnell einzuführen. Für Lkw über 12 Tonnen zGG sowie Last- und Sattelzüge ist durch die Einführung von OH- bzw. bevOH-Lkw eine stärkere Reduzierung des Endenergieverbrauches im Vergleich zum Einsatz von Plug-in-Hybriden möglich. Für die Einführung der OH-Technik ist die Infrastruktur schnellstmöglich entlang der stark befahrenen Autobahnabschnitte aufzubauen.

- Die Geschwindigkeit des Hochlaufs der Elektromobilität entscheidet ganz wesentlich über den (Primär-)Rohstoffbedarf. Ein möglichst gleichmäßiger Hochlauf ist zwar anzustreben, aber mit dem Ziel geringer kumulierter THG-Emissionen abzustimmen.

- Auf PtL-Kraftstoffe entfallen selbst im Jahr 2050 noch große Teile des Energieverbrauches des Verkehrs. Daher ist der Einsatz von erneuerbaren PtL Kraftstoffen im Verkehr rechtzeitig vorzubereiten, um den Markthochlauf sicher zu gewährleisten, der in der Regel im Zeitraum nach 2030 stattfindet. PtL Kraftstoffe sind bevorzugt in internationalen Verkehren einzusetzen. Für den Luftverkehr ist zeitnah die Entwicklung und Umsetzung einer internationalen Einführungsstrategie für erneuerbares PtL notwendig.

- Bei vollständiger Umstellung der internationalen Luftverkehre auf PtL Kraftstoffe wird es keine direkten THG-Emissionen mehr geben. Andere Nicht-CO_2-Klimaeffekte des Luftverkehrs werden jedoch bestehen bleiben, solange die Antriebe weiter auf Verbrennung basieren. Klimaneutrales Fliegen mit heutiger Antriebstechnik – selbst bei Verwendung von PtL – ist daher nicht möglich, so dass auch Maßnahmen und Instrumente zur Vermeidung von Flügen oder zur Optimierung der Flugrouten zur Minderung dieser Nicht-CO_2-Effekte stärker als bisher in den Blick genommen werden müssen.

3.4 Industrie

Industrie und Gewerbe sind wichtige Bestandteile unserer Gesellschaft. Entsprechend des technologischen Fortschritts, sich ändernder Bedürfnisse der Bevölkerung und Änderungen der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind Industrie und Gewerbe einem ständigen Wandel unterlegen. Im Fokus dieser Studie stehen die Herausforderungen auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität Deutschlands als Industriestandort in der globalisierten Welt. Diese erfordern große Veränderungen in der Industrie, weil ohne die Umstellung relevanter Industrieprozesse der notwendige Klima- und Ressourcenschutz nicht zu erreichen sind.

In Industrieprozessen werden auf verschiedene Arten Treibhausgasemissionen verursacht:

- Direkte (energiebedingte) Emissionen aus der Verwendung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe zur Bereitstellung von Energie (z.B. Prozesswärme, Dampf, mechanische Arbeit),

- Direkte (prozessbedingte) Emissionen aus der nicht-energetischen Verwendung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern und sonstigen Rohstoffen, oder aus der prozessbedingten Freisetzung anderer Treibhausgase als CO_2 sowie

- Indirekte energiebedingte Emissionen aus der vorgelagerten Erzeugung des verwendeten Stroms oder der verwendeten Wärme oder Kälte.

Die direkten Treibhausgasemissionen der deutschen Industrie betrugen 1990 283,8 Mio. t $CO_{2Äq}$. Bis zum Jahr 2016 konnten diese bereits auf 188,2 Mio. t $CO_{2Äq}$ (BMU, 2019b) reduziert werden. Hauptverursacher sind die Eisen- und Stahlindustrie (einschließlich Kokereien und Walzwerken), die Zementindustrie, die Kalkindustrie, die chemische Industrie, die Glasindustrie, die Zellstoff- und Papierindustrie sowie die NE-Metallindustrie. Darüber hinaus werden auch in anderen Bereichen des produzierenden Gewerbes durch die Verwendung von Lösemitteln und fluorierten Gasen erhebliche Treibhausgasemissionen verursacht. Den größten Teil der industriellen Treibhausgasemissionen machen die direkten energiebedingten Emissionen aus. Die prozessbedingten

Emissionen, beispielsweise aus Reduktionsprozessen, der Verwendung carbonathaltiger Rohstoffe oder von Lösemitteln und fluorierten Gasen, tragen mit etwa einem Drittel zu den direkten Emissionen bei.

Für die Minderung der direkten Treibhausgasemissionen aus der Industrie müssen je nach Branche, Ursache und Art der Emissionen und prozesstechnischen Herausforderungen unterschädliche Ansätze zur Vermeidung und Minderung verfolgt werden. Ein grundlegender Ansatz zur Minderung der Emissionen ist, durch Steigerung der Materialeffizienz, Konsumverzicht oder die Substitution treibhausgasintensiver Produkte durch weniger treibhausgasintensive Produkte und Dienstleistungen, den Bedarf an treibhausgasintensiven Industrieprodukten und damit auch die Produktionsleistung der Industrie sowie die damit verbundenen THG-Emissionen zu mindern. Dieser Ansatz spiegelt sich in den abnehmenden Produktionsmengen in einzelnen Szenarien wider. Für die direkten energiebedingten Emissionen gibt es folgende grundsätzliche Ansätze zur Minderung der THG-Emissionen:

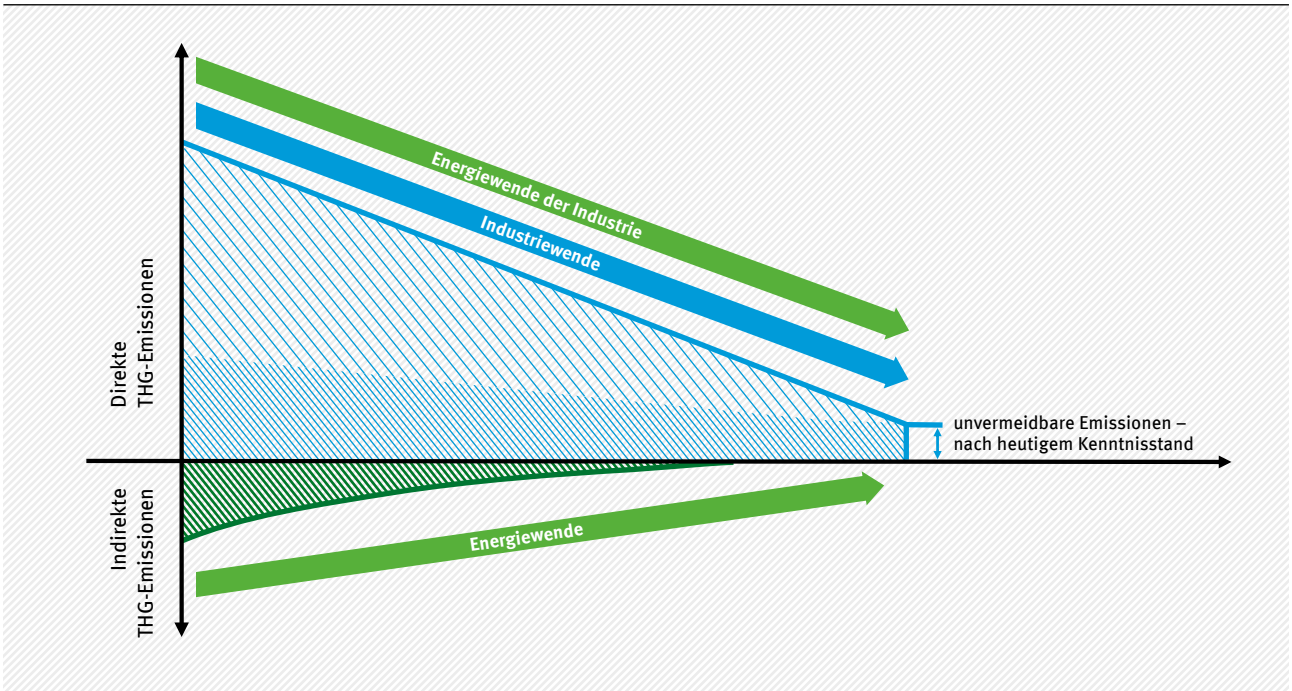
- Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung von energieeffizienten Techniken, Optimierung von Verfahren und Prozessen sowie eine konsequente Abwärmenutzung sowie
- Umstellung auf weniger treibhausgasintensive und erneuerbare Energieträger, und wo technisch möglich auf die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom.

Dabei ist grundlegend wie in allen Anwendungsbereichen die Substitution der fossilen Energien für eine effektive Treibhausgasminderung vom Voranschreiten der Energieversorgung abhängig, siehe Kapitel 3.1. Herausforderungen bestehen vor allem bei der Minderung der direkten prozessbedingten Treibhausgasemissionen, denn hierzu gibt es zwar auch verschiedene Ansatzpunkte, die aber von Branche zu Branche sowie von Produkt zu Produkt unterschiedlich gut umsetzbar sind:

- Vermeiden von Materialien oder Produkten, deren Herstellung mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden ist oder deren Substitution durch weniger treibhausgasintensive Materialien und Produkte sowie
- Vermeiden der rohstoffbedingten bzw. prozessbedingten Emissionen durch grundlegende Verfahrensumstellungen so weit möglich.

Abbildung 19

Qualitative Darstellung der Minderung von industriell verursachten Treibhausgasemissionen



Quelle: Umweltbundesamt

Die indirekten energiebedingten Treibhausgasemissionen können vornehmlich durch die Umstellung auf erneuerbare Energien sowie die Verbesserung der Energieeffizienz gemindert werden.

Abbildung 19 veranschaulicht rein qualitativ die Entwicklung der direkten und indirekten THG-Emissionen auf dem Weg zu einer weitgehend THG-neutralen Industrie. Durch die Energiewende konvergieren die indirekten Emissionen gegen Null, parallel sorgt die „Energiewende in der Industrie“ dafür, dass auch die direkten energiebedingten Emissionen gegen Null gehen, und mit der sogenannten Dekarbonisierung der Industrieprozesse („Industriewende“) werden die direkten prozessbedingten Emissionen auf das nach heutigem Kenntnisstand unvermeidbare Niveau reduziert.

In allen Green-Szenarien wird eine Entwicklung der industriellen Branchen aufgezeigt, in der alle obenstehenden Minderungsansätze verfolgt werden, so dass die energiebedingten Treibhausgasemissionen vollständig vermieden werden, und entsprechend der Szenariencharakterisik, siehe Tabelle 7, der Endenergiebedarf reduziert wird, Innovationen zur Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen erfolgen und die Wechselwirkungen zu den Nachfragebereichen berücksichtigt werden. So wird der Beitrag der Industrie zur Treibhausgasneutralität gewährleistet, wobei ein Verzicht auf die energetische Nutzung von Anbaubiomasse sowie ein Verzicht auf den Einsatz von CCS unterstellt werden.

3.4.1 Entwicklung der Industrie

In den beiden GreenEe-Szenarien werden vor allem technische Maßnahmen zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz sowie die Umstellung auf erneuerbare Energien unterstellt, wobei dort wo technisch möglich der Strom direkt zur Prozesswärmeversorgung genutzt wird (Power to Heat). In GreenMe kommen zusätzliche sehr ambitionierte Maßnahmen zur Materialeffizienzsteigerung hinzu. In GreenLife sind die Änderungen der industriellen Produktion über die technischen Maßnahmen der GreenEe-Szenarien hinaus durch Annahmen zu nachhaltigem Konsum und zur stärkeren Nutzung von langlebigen und reparaturfähigen Produkten ergänzt. In GreenSupreme wirken alle für den Klima- und Ressourcenschutz positiven Maßnahmen parallel. Darüber hinaus erfolgt ergänzend zum Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2030 ein vollständiger Ausstieg aus der Kohlenutzung, was eine schnellere Umstellung der Prozesstechniken bedeutet. GreenLate charakterisiert ein langsameres und weniger ambitioniertes Handeln, so dass bis 2050 die Erneuerung der Produktionstechniken noch nicht abgeschlossen ist. Vielmehr sind dann dort noch konventionelle Techniken in Betrieb, die dann systemisch ineffizient mit erneuerbaren Brennstoffen versorgt werden müssen.

Diesen prinzipiellen Leitlinien bei der Umsetzung der Treibhausgasminderung folgen alle Annahmen für die industriellen Produktionsbereiche in den Szenarien. So werden letztlich in allen Green-Szenarien die energie- und rohstoffbedingten

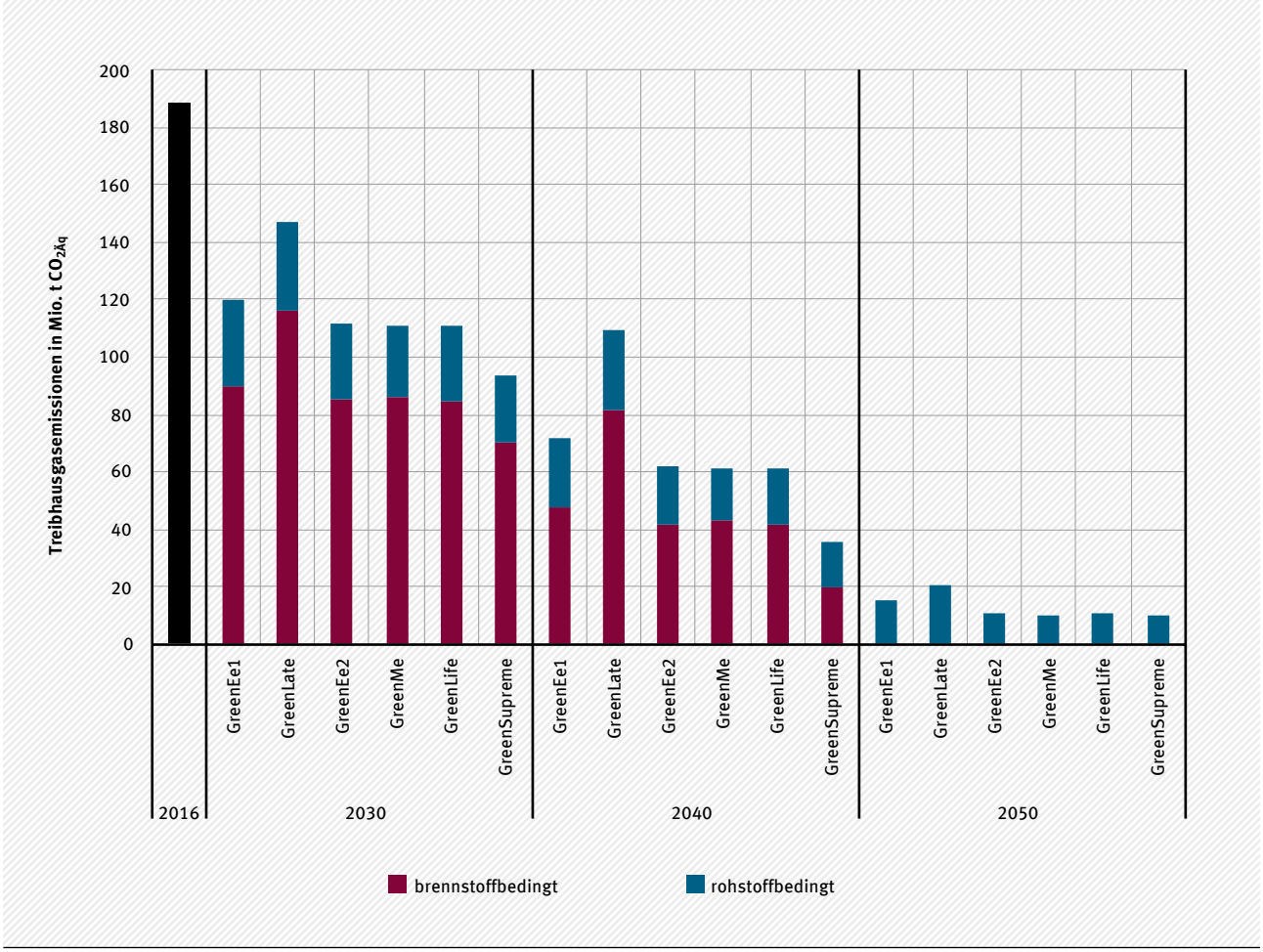
Tabelle 7

Charakteristik der Green-Szenarien im Bereich Industrie

	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Ausstieg aus der Kohlenutzung	bis 2050					bis 2040
Heben der Energieeffizienzpotentiale	sehr hoch	mittel	sehr hoch			
Materialeffizienz der eingesetzten Techniken	hoch	mittel	hoch	sehr hoch	hoch	sehr hoch
Produktionsmengen	i.d.R. konstant		modell-endogen ermittelt, i.d.R. abnehmend			
Einbettung in den internationalen Handel	Exportüberschuss		ausgeglichener Handel			

Abbildung 20

Entwicklung der Treibhausgasemissionen über alle Bereiche der industriellen Produktion hinweg



Hinweis: inklusive der Emissionen aus der Verwendung fluorierter Treibhausgase sowie von Lösemitteln und anderen chemischen Produkten.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e sowie historischen Werte auf Basis von BMU, 2019b

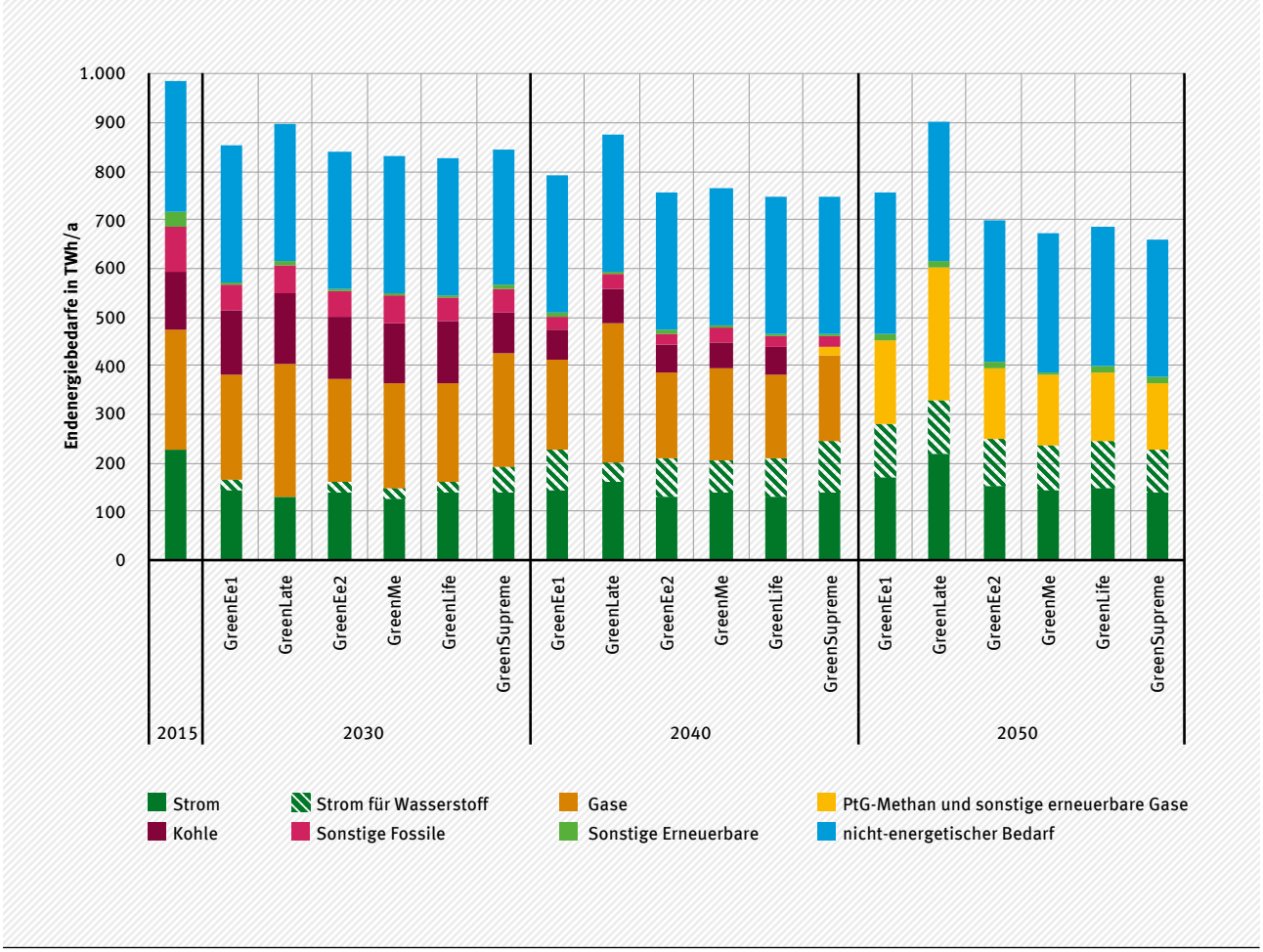
Treibhausgasemissionen der Industrie[23] bis 2050 um rund 96 % gegenüber 1990 gemindert, siehe Abbildung 20. Hauptemittenten der verbleibenden Emissionen sind dann die Zement-, Kalk- und Glasindustrie sowie die chemische Industrie. Die Eisen- und Stahlerzeugung trägt nur noch zu maximal 1,2 % zu den verbleibenden rohstoffbedingten THG-Emissionen bei.

Die Entwicklung der Endenergiebedarfe entsprechend der Szenariencharakteristik ist in Abbildung 21 zu sehen. GreenLate erreicht entsprechend des Szenariocharakters die geringsten Energiebedarfsminderungen, so werden 2050 noch rund 900 TWh Endenergie benötig, was nur eine geringe Reduktion von etwa 9 % gegenüber 2015 bedeutet. In GreenSupreme erfolgt aufgrund der höheren Ambitionen bei Energie- und Materialeffizienz sowie der sinkenden Nachfrage eine Reduktion um 33 % auf rund 660 TWh inklusive der nicht-energetischen Bedarfe. In allen Green-Szenarien wirken bis 2030 vornehmlich Maßnahmen zur Energieeffizienz, erst in den Dekaden danach wirkt sich ergänzend die Umstellung der Prozesstechniken hin zu effizienten Sektorkopplungstechniken auf die benötigten Endenergiebedarfe aus. In GreenSupreme wird von Beginn an ein ambitionierterer Transformationspfad eingeschlagen, so dass frühzeitig eine noch höhere Energie- und Materialeffizienz erreicht wird und die Umstellung der Prozesstechniken frühzeitiger erfolgt. In Kapitel 5.5 der RESCUE-Studie (UBA, 2019f) erfolgen die ausführlichen und branchenspezifischen Ausführungen dazu, nachfolgend wird ein kurzer Ausschnitt auf ausgewählte Branchen gegeben.

23 Bilanzsystematik nach Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung.

Abbildung 21

Entwicklung der Endenergiebedarfe im Bereich Industrie nach Energieträgern



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e und historische Werte auf BMU, 2019b

Eisen- und Stahlerzeugung

Bei der Roheisenerzeugung in Hochöfen können verfahrensbedingt die aus dem Einsatz von Koks resultierenden erheblichen CO_2-Emissionen nicht vermieden werden. Zur Erfüllung der Klimaschutzziele ist es daher unvermeidlich, die Primärstahlerzeugung langfristig von der Hochofen-Oxygenstahlwerk-Route auf andere, deutlich weniger THG-intensive Produktionsverfahren umzustellen. Günstige Voraussetzungen bietet die Sekundärstahlerzeugung über die Elektroofenroute, weil hier der Endenergiebedarf vollständig durch Strom gedeckt werden kann. Es wird daher in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife die sehr optimistische Annahme getroffen, dass das Schrottaufkommen von aktuell 45 % der Rohstahlproduktion (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2019) bis 2050 auf 67 % ansteigt. In GreenLate wird nur ein Anstieg auf 50 % unterstellt. In GreenSupreme erfolgt die Umstrukturierung ambitionierter, d.h. es wird bereits im Jahr 2040 ein Anteil von 67 % angenommen. Bei der Elektrostahlerzeugung verbleiben durch die vollständige Nutzung von erneuerbaren Strom nur noch die spezifischen CO_2-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand in 2050, welche dann noch etwa halb so hoch sind wie heute. Neben der Ausweitung der Elektrostahlerzeugung wird eine Umstellung der primären Eisen- und Stahlerzeugung auf wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren (engl. DRI für „direct reduced iron“) unterstellt. Es wird in allen Green-Szenarien außer GreenLate angenommen, dass die benötigte Menge an Stahl aus primären Rohstoffen ab 2030 zunehmend, bis 2050 im wesentlichen durch eine Kombination aus mit Wasserstoff betriebenen Direktreduktionsanlagen und Elektrolichtbogenöfen erzeugt wird. In GreenSupreme erfolgt der Technologieumbau bereits im Zeitraum von 2025 bis 2040, um den Ausstieg aus der Kohlenutzung bis 2040 zu realisieren. Auch in GreenLate wird ein

vollständiger Prozesswechsel angenommen, allerdings wird angenommen, dass in den DRI-Anlagen 2030 noch 75 % und 2050 noch 25 % Erdgas oder erneuerbares strombasiertes Gas eingesetzt werden. Nähere Details sowie Annahmen zur Effizienzsteigerung finden sich in der RESCU-Studie im Kapitel 5.5.2 (UBA, 2019f).

Chemische Industrie

Die chemische Industrie als energieintensive Branche ist geprägt durch die Vielzahl an unterschiedlichen Produkten und heterogenen Produktionsverfahren. Rohstoff für die heterogenen und komplexen Produktionsprozesse sind fossile Energieträger, wie Erdöl, Erdgas und Kohle. Es wird unterstellt, dass der Endenergiebedarf bis 2050 vollständig durch erneuerbare Energien bereitgestellt wird. Der Rohstoffbedarf, bspw. für die Kunststoffherstellung oder die Herstellung von Industrieruß, wird bis 2050 im wesentlichen durch auf erneuerbaren Energien basierende Kohlenstoffträger (PtG/PtL) gedeckt. Konkret wird für alle Green-Szenarien sehr konservativ von einer positiven Wertschöpfung der chemischen Industrie bei einem gleichbleibenden Bedarf an Ausgangsrohstoffen ausgegangen. Dieser entspricht einem Energieäquivalent von 282 TWh pro Jahr.[24] In Hinblick auf die Effizienz des Gesamtsystems aus Stromerzeugung, PtG/PtL-Erzeugung und deren Weiterverarbeitung erscheint es geboten, die Prozessketten in der chemischen Industrie je nach Produkt auf unterschiedliche PtG/PtL- Produkte als Ausgangsstoff umzustellen, um die Umwandlungsverluste und damit den erheblichen Strombedarf für die Rohstoffbereitstellung zu begrenzen. Hierzu besteht noch Forschungsbedarf. Spätestens ab 2030 kann die Umstellung der Wasserstoffwirtschaft auf erneuerbare Energie (PtG-Wasserstoffelektrolyse) erfolgen.

Vor dem Hintergrund höherer anzustrebender Recyclingraten und Lebensdauern von Produkten wird in den Green-Szenarien unterstellt, dass bereits 2030 Teile der chemischen Industrie auf fossile Energieträger verzichten und auf PtG/PtL-Produkten basieren, damit bei der späteren Entsorgung (Verbrennung) der hergestellten Endprodukte in 2050 oder später keine fossilen CO_2-Emissionen mehr entstehen.[25]

Zementindustrie

Die Herstellung von Zement ist unvermeidbar mit der Freisetzung von CO_2 verbunden. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen der Produktionsprozesse können wie in anderen Industriebranchen durch eine vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien vermieden werden, wenn auch nur teilweise durch die direkte Nutzung von Strom. Die rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen können nur gemindert werden, wenn alternative Bindemittel und Baumaterialien je nach Nachfragebereich gefunden werden. Es wird davon ausgegangen, dass die entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfolgreich sind, so dass herkömmlicher Zement zunehmend durch alternative Bindemittel ersetzt wird und diese im Jahr 2050 einen Anteil von 50 % erreichen. In GreenLate werden diese Forschungstätigkeiten und Entwicklungen nicht in ausreichendem Maße verfolgt oder sind nicht erfolgreich, so dass in diesem Szenario keine Umstellung auf alternative Bindemittel erfolgt.

Aufgrund der Wechselwirkungen mit den anderen Handlungsfeldern, bspw. Änderungen in Umfang und Art des Wohnungsbaus und von Infrastrukturen, nimmt die Produktionsmenge in den Green-Szenarien teilweise deutlich ab, für nähere Informationen siehe Kapitel 5.5.6 in der RESCUE-Studie (UBA, 2019f). In GreenSupreme wird so unter sehr optimistischen Annahmen für die Nachfrageentwicklung, die Material- und Energieeffizienz sowie für die Umstellung auf alternative Bindemittel eine Reduktion der THG-Emissionen um 80 % gegenüber 2010 erreicht.

3.4.2 Schlussfolgerungen

Zur Erreichung der Klimaschutzziele müssen die Industrieanlagen bis 2050 nicht nur vollständig auf erneuerbare Energieträger umgestellt, sondern auch ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umgebaut werden. Dabei ist der Investitionsaufwand für den Umbau der Industrieprozesse zu begrenzen und sollte entsprechend der üblichen Erneuerungszyklen

24 In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wäre durch die nachfrageseitigen Änderungen mit sinkenden Rohstoffbedarfen zu rechnen. Im Projekt konnten modellendogen die komplexen Produktionsstrukturen in der chemischen Industrie nichthinreichend abgebildet werden. Auf pauschale Annahmen wurde gleichfalls verzichtet. Zu den Auswirkungen siehe Textbox 5-2 in der RESCUE-Studie (UBA, 2019f).

25 Siehe Kapitel 5.2, so wird für die erforderlichen Klimaschutzeffekte unterstellt, dass es sich um zusätzlichen vollständigen erneuerbaren Strom handelt (UBA, 2019f).

erfolgen. Hierfür ist das Voranschreiten der Energieversorgung erforderlich und sind frühzeitig erforderliche Forschungs- und Weiterentwicklungsbedarfe zu initiieren. Nur so kann bei Anlagen mit langen Nutzungszeiten oder Erneuerungszyklen (z.B. Hochöfen) die Umstellung des gesamten Anlagenparks bis 2050 abgeschlossen werden.

Zentraler Baustein auf dem Weg zu einer treibhausgasarmen Industrie ist der vollständige Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger für energetische und nicht-energetische industrielle Anwendungen.

- Die Substitution fossiler Energieträger sollte, soweit technisch möglich, durch die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom (z.B. zur Prozesswärmeerzeugung) erfolgen, um den Gesamtenergiebedarf für das Energiesystem zu begrenzen. Hier besteht in einigen Industriebranchen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

- Erneuerbare Brennstoffe sollten in der Industrie nur dort zum Einsatz kommen, wo Strom aus technischen Gründen nicht genutzt werden kann (z.B. zur Erhitzung fester, schlecht wärmeleitender Einsatzstoffe).

- Die fossile Wasserstoffwirtschaft in Deutschland, ggf. mit einem zeitnahen Fokus auf die Petrochemie, sollte ab 2030 auf erneuerbare Energien durch Integration von Wasserstoffelektrolyse umstrukturiert werden.

- Gleichfalls muss auch der Rohstoffbedarf der Chemieindustrie (organischen Chemie) spätestens 2050 vollständig durch erneuerbare Energien (PtG/PtL) gedeckt werden. Vor dem Hintergrund der Langlebigkeit und erhöhten Recyclingraten sind langlebige Produkte bereits ab 2030 durch erneuerbare Energieträger in der chemischen Industrie zu substituieren.

Die Industrieprozesse müssen bis 2050 nicht nur vollständig auf erneuerbare Energieträger umgestellt, sondern es muss auch ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umgebaut und dahingehend weiterentwickelt werden, dass auch rohstoffbedingte bzw. prozessbedingte Treibhausgasemissionen gemindert werden.

- Treibhausgasarme Produktionsverfahren müssen schnell bis zur Anwendungsreife im großindustriellen Maßstab gebracht werden. Bei Anlagen mit langen Nutzungszeiten oder Erneuerungszyklen (z.B. Hochöfen) sollte möglichst bald, spätestens ab 2030, der Umbau gewährleistet werden und erfolgen.

- Alternative treibhausgasarme oder -neutrale Produkte zur Substitution von Produkten, die durch ihre Produktionsprozesse unweigerlich mit dem Freisetzen von Treibhausgasemissionen verbunden sind (bspw. Zementproduktion), müssen entwickelt, zur Marktreife geführt und integriert werden.

Flankiert durch ambitionierte Maßnahmen zur Energieeffizienz und Materialeffizienz wird der erforderliche Endenergiebedarf beeinflusst, die Integration der erneuerbaren Energien entlastet, im Transformationspfad ein wesentlicher Beitrag zur Treibhausgasminderung geleistet sowie die erforderliche kumulierte Primärrohstoffinanspruchnahme und die langfristige dauerhafte neue Primärinanspruchnahme beeinflusst. Parallel zum Umbau des Anlagenparks in der Industrie sind Minderungs- und Vermeidungsansätze zu verfolgen:

- Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung von energieeffizienten Techniken, Energiemanagement, Optimierung von Verfahren und Prozessen sowie eine konsequente Abwärmenutzung,

- Steigerung der Materialeffizienz in den Verarbeitungsprozessen,

- Steigerung der Recyclingraten durch eine bessere Sekundärrohstofferfassung, effizierte Aufbereitung und möglichst hochwertige Verwertung,

- verstärkte Anwendung von Substitutitonstechnologien, u.a. durch regelmäßig aktualisierte und fortgeschriebene Substitutionsroadmaps,

- Nachfrage nach und Angebot von langlebigen und reparaturfähigen Produkten steigern,

- nachhaltiges Konsumverhalten fördern.

3.5 Abfall und Abwasser

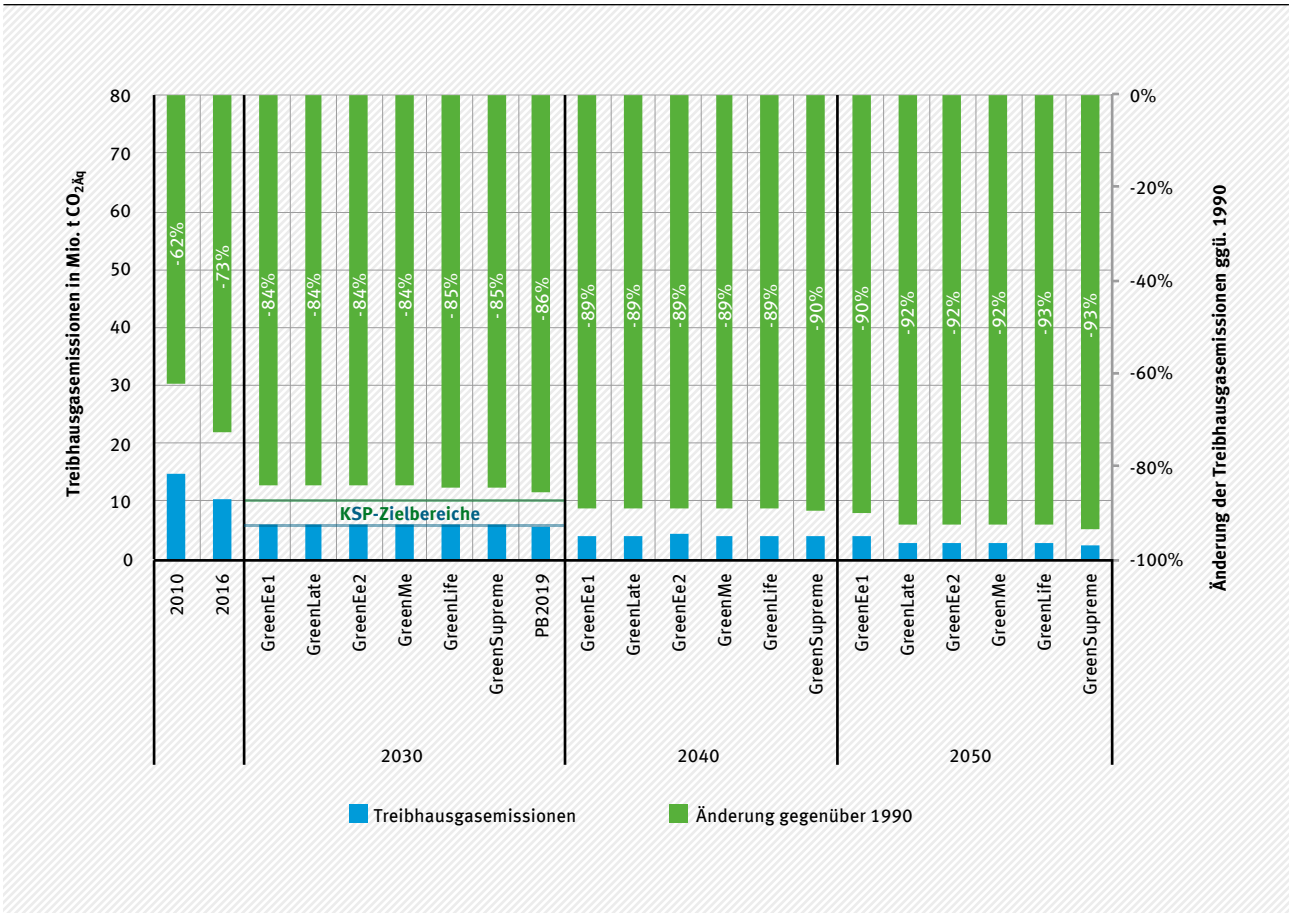
Die Entsorgung von Abwasser und Abfall ist ein zentraler Pfeiler der öffentlichen Gesundheitsvorsorge und schützt die Umwelt vor unerwünschten Einträgen. Auch künftig werden sowohl die Entsorgung des Abwassers als auch die Entsorgung des Abfalls eine wichtige Rolle spielen. Damit einhergehend ist der Ausstoß von Treibhausgasen, welcher durch Abfall- und Abwassertechnik, durch die vorgelagerten Prozesse zur Produktion von Produkten, Umfang von Recycling und Erfassung von Abfällen sowie der Lebensweise und Ernährung der Menschen beeinflusst wird.

Von mehr als 38 Mio. t $CO_{2Äq}$ im Jahr 1990 werden diese auf unter 3 Mio. t $CO_{2Äq}$ in 2050 reduziert, wobei die einzelnen Green-Szenarien sich nur geringfügig unterscheiden. Die Unterschiede beruhen auf einer gesteigerten Materialeffizienz in GreenMe, Verhaltensänderung bspw. bei Verpackungen sowie eine reduzierte Proteinzufuhr in GreenLife und beides gemeinsam in GreenSupreme. Sowohl die Reduktion der Treibhausgasemissionen als auch die effiziente Ressourcennutzung werden im Sektor Abfall und Abwasser wesentlich von den folgenden Maßnahmen beeinflusst:

- Konsequenter Ausbau des Recyclings und damit Ersatz von Primärrohstoffen,
- Vermeidung sämtlicher Abfallströme, die nicht auf erneuerbaren Energien basieren und eine anspruchsvolle Kaskadennutzung der unterschiedlichen Rohstoffe,
- systemische und flexible sektorunabhängige und mit Blick auf den Klimaschutz sinnvolle Nutzung der erneuerbaren Ressource Klärgas.

Abbildung 22

Entwicklungen der Treibhausgasemissionen im Sektor Sonstige für die Green-Szenarien bis 2050



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e und PB2019 BMU, 2019b

3.6 Landwirtschaft und LULUCF

Die Landwirtschaft hat mit der Erzeugung von gesunden Lebensmitteln eine besondere Bedeutung für die Gesellschaft. Sie ist aber auch Quelle von Treibhausgasemissionen und gleichzeitig besonders anfällig für die Folgen des Klimawandels. Aufgrund der natürlichen, physiologischen Prozesse können Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft, z.B. Methan, das bei der Verdauung von Wiederkäuern oder Lachgas, das bei der Nutzung landwirtschaftlicher Böden entsteht, nur zum Teil durch technische Maßnahmen vermieden werden. Das heißt, zusätzlich zu den technischen Maßnahmen, dazu gehören z.B. die Vergärung von Wirtschaftsdüngern und Effizienzsteigerungen bei der Düngung, sind geänderte Produktionssysteme, z.B. der ökologische Landbau und weitergehende strukturelle Maßnahmen notwendig, um die Klimaschutzziele in Deutschland bis 2050 zu erreichen. Um die Emissionen der Landwirtschaft so weit wie möglich zu senken, ist ein Umbau des Agrar- und Ernährungssystems erforderlich. Im Vordergrund steht der Abbau der Viehbestände (insb. der Wiederkäuer), verbunden mit der Reduktion des Konsums tierischer Produkte auf ein gemäß der DGE-Empfehlungen gesundes Maß. Auch die Reduktion der Lebensmittelverschwendung birgt THG-Einsparpotenzial, wenn durch weniger Verluste weniger produziert werden muss. Eng verbunden mit der Landwirtschaft ist die weitere Art der Landnutzung. Während die Landwirtschaft aufgrund der oben erwähnten Prozesse immer eine Quelle bleiben wird, kann die (übrige) Landnutzung auch als Senke wirken. Natürliche Senken werden ebenso wie Emissionen mit Landbezug, neben Ackerland auch Wald, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungsflächen und sonstige Flächen, gemäß der internationalen Klimaberichterstattung dem Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) zugerechnet. Im Sektor LULUCF gilt es somit, sowohl Emissionen zu vermeiden als auch Senken zu erhalten und wieder herzustellen, u.a. durch

- Erhalt der Waldkohlenstoffsenke,
- Erhalt von Mooren und Wiedervernässung von Moorböden sowie
- Stopp der Umwandlung von organischen Böden in Siedlungs- und Verkehrsflächen.

Durch das Variieren der unterschiedlichen Parameter spannen die Green-Szenarien entsprechend ihrer Charakteristika einen Lösungsraum für die Entwicklung in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF auf, wie in Tabelle 8 dargestellt ist. In allen Green-Szenarien erfolgt die Umsetzung der technischen Klimaschutzmaßnahmen in vollem Umfang. Die energetische Nutzung von Anbaubiomasse endet in allen Green-Szenarien ab 2030. Darüber hinaus erreichen alle Szenarien bis 2050 einen Anteil des ökologischen Landbaus von 20 %.[26]

3.6.1 Entwicklung der Landwirtschaft

Emissionen der Landwirtschaft entstammen überwiegend aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden und der Tierhaltung. Während bei der Bodenbewirtschaftung vor allem technische Maßnahmen greifen können, liegen die Potenziale bei der Tierhaltung in der Änderung bestehender Strukturen im Agrar- und Ernährungssystem.

Bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung werden aufgrund der Stickstoffdüngung mit Mineral- und Wirtschaftsdünger große Mengen Lachgas und indirekter Treibhausgase, z.B. Ammoniak, freigesetzt. Somit bestehen bei der Stickstoffdüngung und dem Wirtschaftsdüngermanagement große Potenziale zur Emissionsreduktion. In allen Green-Szenarien wird durch eine gesteigerte Stickstoffeffizienz (z.B. erreichbar durch die Optimierung der Düngeplanung und der Ausbringungstechniken) und einem geringeren Mineraldüngerbedarf der Stickstoff-Gesamtüberschuss auf maximal 50 kg N pro ha bis 2030 gesenkt. Dadurch können vor allem direkte und indirekte Lachgas-Emissionen verringert werden[27]. Bei der Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern wird vorrangig Methan, aber auch Lachgas freigesetzt. Mit einer Vergärung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen und gasdichter Lagerung der Gärreste können diese Emissionen reduziert werden. Es wird daher angenommen, dass ab 2030 alle Gärrestlager abgedeckt sind und bis 2050 alle erfassbaren Mengen an Gülle und Mist in Biogasanlagen vergoren werden.

26 Die methodische und datenspezifische Basis für die Berechnung dieses Teilaspektes bildet die UBA-Studie „THGND“ (UBA, 2014). In der vorliegenden Studie und dem hier zur Anwendung kommendem Model ALMOD war eine Variation des Ökolandbauanteils in 2050 nicht in einem vertretbaren Aufwand-Nutzen-Verhältnis möglich, wenngleich dies aufgrund der geringeren THG-Emissionen des Ökolandbau bei einer flächenbezogenen Betrachtung zielführend gewesen wäre.

27 Auch die Produktion der Mineraldünger verursacht erhebliche Treibhausgasemissionen. Diese werden jedoch gemäß internationaler Klimaberichterstattung aber nicht der Landwirtschaft zugerechnet sondern der chemischen Industrie. Diese Zurechnung wird auch in der vorliegenden Studie beibehalten.

Tabelle 8

Charakteristik der verschiedenen Green-Szenarien im Bereich Landwirtschaft und LULUCF

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
Änderungen des Fleisch-konsums	hoch	hoch	hoch	sehr hoch, sehr schnell	sehr hoch, sehr schnell
Änderung des Milchkonsums	keine	keine	keine	Abnahme bis 2050	Abnahme bis 2050
Ambitionsniveau bei Änderung der Produktionskapazitäten	mittel/sehr hoch	mittel	mittel	sehr hoch	sehr hoch
Ambitionsniveau bei der Nutzung von Holzprodukten	mittel	mittel	sehr hoch	mittel	sehr hoch
Moorwiedervernässung	5 % p.a. ab 2020	5 % p.a. ab 2022	5 % p.a. ab 2020	5 % p.a. ab 2020	5 % p.a. ab 2020

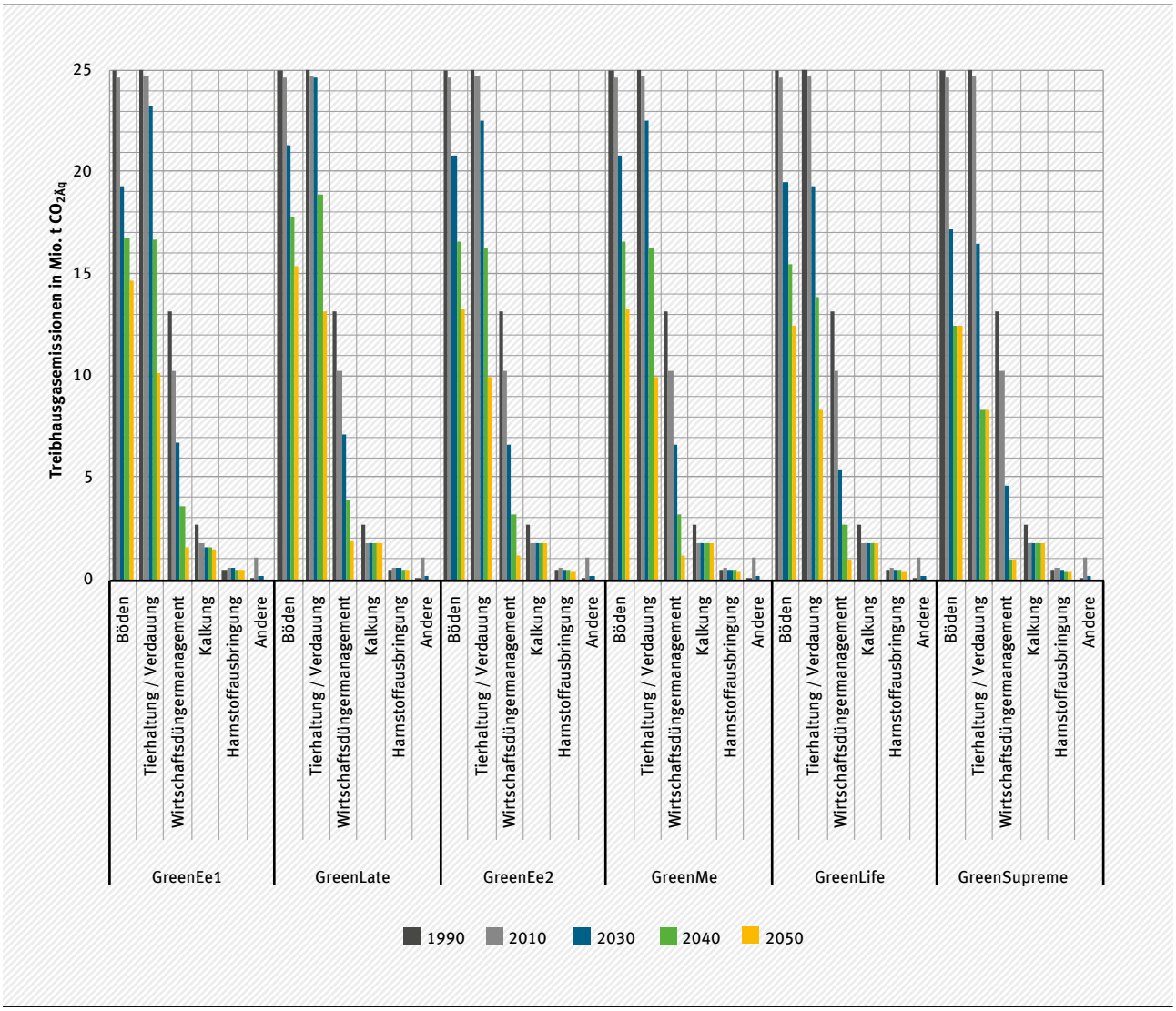
Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen werden ab dem Jahr 2030 in Deutschland außerdem keine nachwachsenden Rohstoffe mehr eigens für die energetische Nutzung angebaut. Somit sinken die Emissionen der Gärreste aus NaWaRo-Biogas ab 2030 auf null. Entsprechend der Szenariencharakteristik erfolgt die Umsetzung dieser Maßnahmen in GreenLate verzögert.

Unser Ernährungs- und Konsumverhalten hat erheblichen Einfluss auf die Höhe der Treibhausgasemissionen. Veränderte Konsum- und Ernährungsgewohnheiten sind, wenn sie sich auf die Produktion der heimischen Agrargüter auswirken, eine der wesentlichen Stellschrauben zur Reduktion der Emissionen. So werden derzeit in Deutschland jährlich rund 11 Mio. t verzehrfähige Lebensmittel im Abfall entsorgt. Dies führt sowohl zu vermeidbaren Treibhausgasemissionen als auch zu vermeidbaren Ressourceninanspruchnahmen vor allem Wasser und Fläche. Daher werden in allen Green-Szenarien die Lebensmittelabfälle bis 2050 um 50 % reduziert. Der resultierende Nachfragerückgang wird berücksichtigt.

Die Erzeugung tierischer Lebensmittel und der steigende Verarbeitungsgrad von Lebensmitteln verursachen hohe Emissionen. Für den Anbau der Futtermittel müssen nicht nur zusätzliche energieintensive Dünge- und Pflanzenschutzmittel hergestellt werden, ihr Anbau verursacht global auch großflächige Landnutzungsänderungen (Grünlandumbruch und Entwaldung) und damit weitere hohe Emissionen (Grünberg et al., 2010). Neben den direkten und indirekten Emissionen aus dem Futtermittelanbau stoßen insbesondere Wiederkäuer das sehr klimaintensive Methan aus. Eine gesündere Ernährung durch verringerten Konsum tierischer Erzeugnisse ist dementsprechend eine der effektivsten Maßnahmen zur Minderung von THG-Emissionen aus dem Bereich Landwirtschaft. In den Green-Szenarien werden daher die DGE-Empfehlungen (DGE, 2017) für pflanzliche (Obst, Gemüse, Getreideprodukte, Kartoffeln, Hülsenfrüchte) und tierische Produkte (Fleisch, Milch und Eier) als Grundlage für die Ernährungsweise der deutschen Bevölkerung in 2050 angesetzt. Das Ambitionsniveau und der Zeitpunkt der Erreichung dieses Ziels variieren. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenMe wird für den Fleischverzehr angenommen, dass sich dieser bis 2050 auf 30 % des heutigen Verzehrs von ca. 1150 g pro Person pro Woche reduziert. In den durch Veränderungen der Lebensstile geprägten Szenarien GreenLife und GreenSupreme wird die Untergrenze der DGE-Empfehlung beim Fleischverzehr ab 2040 angenommen. Das entspricht einer Verzehrmenge von 300 g pro Person wöchentlich. Gleichzeitig wird in diesen zwei Szenarien angenommen, dass der Konsum von Frischmilch um 15 % bis 2040 zurückgeht, da sich mehr Menschen vegan ernähren und Milch teilweise durch Sojamilch aus heimisch angebautem Soja ersetzt wird. Mit der Umstellung der Ernährungsgewohnheiten, insbesondere der deutlichen Verringerung des Fleischkonsums, geht in den Green-Szenarien auch eine entsprechende Reduktion der heimischen

Abbildung 23

Quellgruppenspezifische Ergebnisse der Treibhausgasemissionen im Bereich der Landwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

Fleischproduktion einher[28]. Hierdurch werden die Tierbestände entsprechend der Szenariencharakteristika in den Green-Szenarien unterschiedlich stark reduziert und der Abbau unterschiedlich schnell realisiert. Während im GreenLate-Szenario davon ausgegangen wird, dass durch einen verpassten Start zunächst nur ein moderater Abbau der Viehbestände realisiert wird, werden die Versäumnisse später nachgeholt, und die Tierbestände werden ab 2030 bis 2050 kontinuierlich linear reduziert. Im GreenLife Szenario wird von einem linearen Rückgang der Tierbestände ab 2020 ausgegangen, um den Zielwert, Ernährung gemäß Untergrenze der DGE-Empfehlung, 2050 zu erreichen. In GreenSupreme wird dieses Ziel bereits 2040 erreicht, was einen noch stärkeren Abbau der Viehbestände zur Folge hat. In GreenEe1 und GreenEe2 wird angenommen, dass die Tierbestände bis 2030 lediglich in geringem Umfang abnehmen. Danach wird ein kontinuierlicher Rückgang der Tierbestände auf rund ein Drittel des heutigen Niveaus bis 2050 realisiert. Einhergehend mit der Abnahme der Tierbestände sind geringere Emissionen aus der Verdauung von Wiederkäuern sowie geringere Mengen an anfallendem Wirtschaftsdünger.

28 In der UBA-Studie „THGND“ (UBA, 2014) wird unter den getroffenen Annahmen des ÖKO20%-Szenarios ein Selbstversorgungsgrad bei Fleisch von 345% erreicht. Da die Annahmen dieses Szenarios auch in den Szenarien GreenEe1 und GreenLate zugrunde liegen, bedeutet dies, dass sich eine Anpassung der Fleischnachfrage in diesen beiden Szenarien nicht unmittelbar in einer reduzierten Fleischproduktion abbilden lässt. In den Szenarien GreenEe2, GreenMe, GreenLife und GreenSupreme wurde unter der übergreifenden Prämisse, die Handelsbilanzen stärker auszugleichen der Selbstversorgungsanteil bei tierischer Nachfrage mit 150% angenommen. Der Ausgleich erfolgt im Wesentlichen durch die Anpassung der Schweine- und Geflügelbestände.

Die oben dargestellten Maßnahmen führen dazu, dass in den Green-Szenarien Treibhausgasmissionsreduktionen in der Landwirtschaft von 59 % (GreenLate) bis 70 % (GreenLife/GreenSupreme) gegenüber 1990 erreicht werden können. Durch die gesündere Ernährung und Umsetzung der DGE-Verzehrempfehlung für Fleisch bei gleichzeitigem Abbau der Tierbestände, sinken die Emissionen in der hier größten landwirtschaftlichen Quelle, der Tierhaltung, so weit, dass sie in GreenLife und GreenSupreme bereits 2030 erstmals geringer sind als die Emissionen aus den Böden, siehe Abbildung 23. In GreenLate werden die Böden erst in der Dekade nach 2040 zum Hauptemissionsverursacher, da die Tierbestände in den Kategorien Rinder, Schweine und Geflügel in den verschiedenen Szenarien unterschiedlich stark und schnell reduziert werden. Eng verbunden mit der Tierhaltung ist die Menge verfügbaren Wirtschaftsdüngers. Die Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement werden in allen Szenarien durch eine vollständige Vergärung und gasdichte Abdeckung der Gärrestlager auf ein Minimum (Restemissionen betragen rund 1 Mio. t $CO_{2Äq}$) reduziert.

3.6.2 Entwicklung der Senken

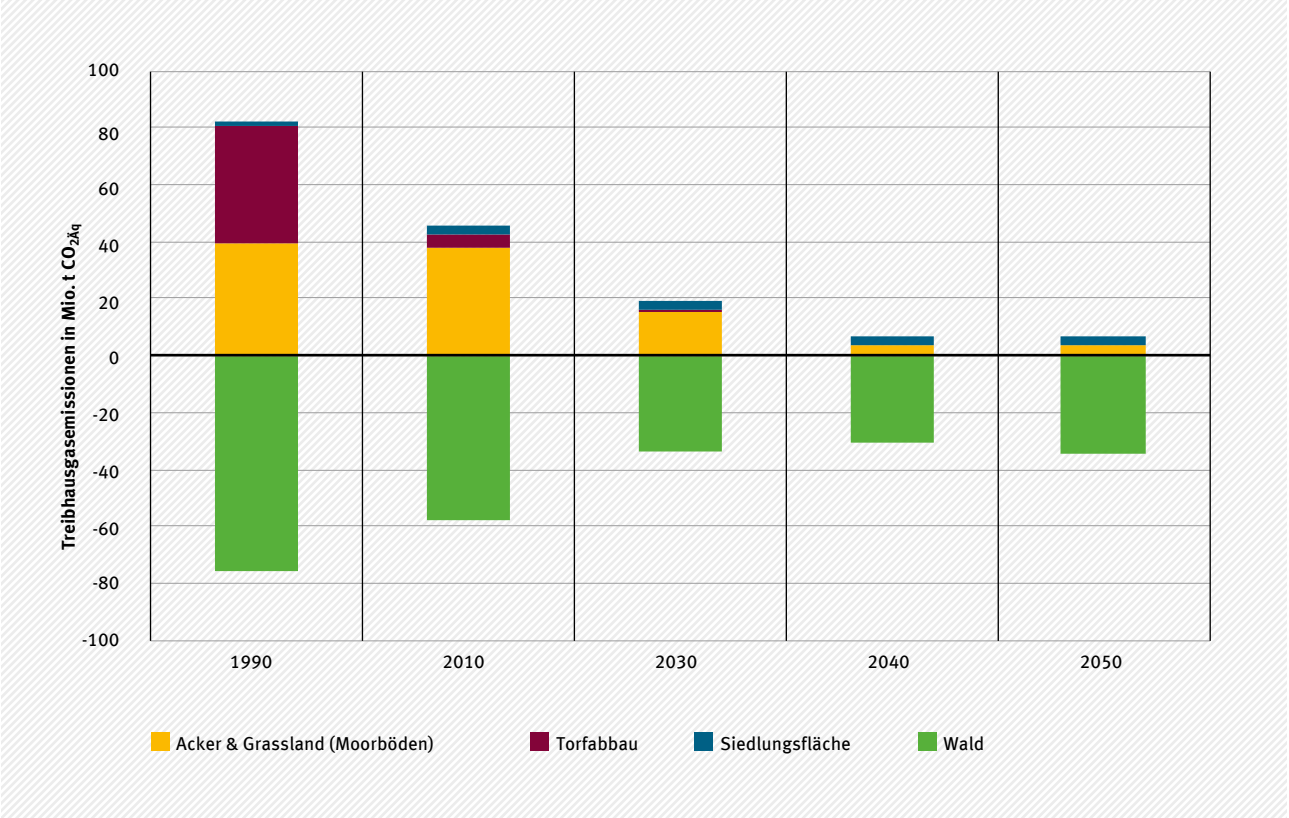
Rund 6,5 % der landwirtschaftlichen Flächennutzung in Deutschland findet auf trockengelegten Mooren statt (ca. 1 Mio. ha.). Jedoch sind ca. 92-97 % der CO_2 Emissionen der landwirtschaftlichen Böden auf diese Fläche zurückzuführen (UBA, 2019a). Die Wiedervernässung trockengelegter Moore ist daher eine der wirksamsten Maßnahmen in der Landnutzung. Mit Ausnahme des GreenLate Szenario wird in den Green-Szenarien davon ausgegangen, dass 5 % der landwirtschaftlichen Fläche auf trocken gelegten Moorböden jährlich ab 2020 restauriert werden. Ziel ist es, 2050 lediglich ca. 180.000 ha siedlungs- und infrastrukturnahe ehemalige Moorflächen zu nutzen. Hierdurch sinken die Treibhausgasemissionen ab 2040 auf 4 Mio. t. Im GreenLate-Szenario spiegelt die Wiedervernässung der Moore das szenariospezifische geringere Ambitionsniveau zu Beginn des Pfades wieder. Bis 2021 sind ca. 100.000 ha Moor wiedervernässt. Von 2022 bis 2030 wächst die wiedervernässte Fläche ebenfalls jedes Jahr um 5 %. Die Zielerreichung wird somit auch in diesem Szenario bis 2040 gewährleistet. Die daraus entstehenden Einschränkungen für die landwirtschaftliche Produktion werden durch eine Abnahme der Tierbestände berücksichtigt, da hierdurch Flächen freigesetzt werden, die zuvor dem Futtermittelanbau dienten. Betroffen sind etwa 1 Million Hektar intensiv genutzten Ackerlandes. Um noch bestehende Moore zu erhalten und renaturieren zu können, werden Torfprodukte schrittweise vollständig durch alternative Substrate ersetzt und damit der Torfabbau bis 2040 gestoppt.

In allen Green-Szenarien wird der Wald als Netto-Kohlenstoffsenke erhalten. Dabei orientieren sich die Green-Szenarien an dem aktuellen „Naturschutzszenario“ des Modells für Waldentwicklung und Holzaufkommen (WEHAM, Oehmichen et al., 2018). Entsprechend verlängern sich insbesondere die Umtriebszeiten in Laubholzmischbeständen, und die ungenutzte Waldfläche (Prozessschutz) wird auf 6,9 % erhöht. Gleichzeitig werden Waldbestände, die nicht einer natürlichen potenziellen Vegetation entsprechen (überwiegend Nadelholzbestände) aktiv umgebaut, was zunächst zu einer intensiveren Waldnutzung führt. Durch diese Maßnahmen wird davon ausgegangen, dass insgesamt das Holzaufkommen verringert wird, wodurch der Holzproduktspeicher abnimmt. Jedoch steht dem verringerten Holzaufkommen auch ein verringerter Holzbedarf entgegen, insbesondere durch den kontinuierlichen Rückgang der energetischen Nutzung von Waldrestholz bis zum vollständigen Verzicht in 2050.

Um unter anderem den weiteren Druck auf die land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen zu minimieren, sinkt die Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr schrittweise. In den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenMe auf etwa 20 ha pro Tag in 2030 und bis 2050 netto auf 0 ha. In den Szenarien GreenLife und GreenSupreme wird 2030 bereits eine Flächenneuinanspruchnahme von 10 ha/Tag erreicht, welche anschließend linear bis 2050 auch auf netto 0 ha sinkt. Grund für die schnellere Zielerreichung in diesen zwei Szenarien sind die nachhaltigeren Lebensstile und die damit verbundene Reduzierung der Wohnfläche (vgl. Kapitel 3.2.1) sowie der Nachfrage nach Infrastruktur (z.B. Straßennetze). Die bereits umgewandelten Flächen auf organischen Böden emittieren in 2050 weiterhin 2,5 Mio. t $CO_{2Äq}$ trotz des vollständigen Halts der netto Neuinanspruchnahme. GreenLife und GreenSupreme führen mit der schnelleren Zielerreichung zu ca. 2 und 1 Mio. t $CO_{2Äq}$ weniger in 2030 und 2040.

Abbildung 24

Treibhausgasminderung der Landnutzung im GreenEe1-Szenario*



* Auf die Darstellung aller Szenarien wird hier verzichtet, da Abweichungen zwischen den Szenarien grafisch kaum darstellbar sind.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a

Im Ergebnis werden in den Green-Szenarien die Quellen der Emissionen im Sektor LULUCF, vor allem die Nutzung organischer Böden und Torfabbau, von über 40 Mio. t in 2010 auf ca. 6,5 Mio. t bis 2050 reduziert. Gleichzeitig bleibt die Kohlenstoffsenke im Wald groß genug, um diese restlichen Emissionen um das Fünffache auszugleichen (Abbildung 24). Nach dem Naturschutzszenario des WEHAM Models (Oehmichen et al., 2018) nimmt der Wald in 2050 noch ca. 35 Mio. t CO_2 aus der Atmosphäre auf. Durch die Wiedervernässung von insgesamt 80 % der organischen Böden, ist es in allen Szenarien möglich, die größte Emissionsquelle des LULUCF Sektors von ca. 38 Millionen Tonnen in 2010 auf 4 Mio. t bis 2050 zu reduzieren. Im Szenario GreenLate entstehen wegen der verspäteten Wiedervernässungsmaßnahmen zwar bis 2030 höhere Emissionen bei den organischen Böden, diese werden aber vor 2030 beschleunigt, so dass die THG-Emissionen ebenfalls auf 4 Mio. t $CO_{2Äq}$ bis 2040 reduziert werden. Obwohl die Versieglung in allen Szenarien bis 2050 gestoppt werden kann, bleiben ca. 2,5 Mio. t $CO_{2Äq}$ Emissionen von Siedlungen bestehen. Ursache sind die weiterhin andauernden Emissionen trockengelegter Moorböden auf diesen Flächen. In den Szenarien GreenLife und GreenSupreme findet eine beschleunigte Reduzierung der Emissionen aus Siedlungsfläche statt, jedoch bleiben in 2050 ebenfalls Restemissionen in Höhe von 2,5 Mio. t bestehen.

3.6.3 Schlussfolgerungen

THG-Minderungsziele sind in der Landwirtschaft und der Landnutzung grundsätzlich nur mit großen Anstrengungen erreichbar. Emissionen der Landwirtschaft können aufgrund physiologischer Prozesse nicht auf null reduziert werden, daher wird der relative Anteil der landwirtschaftlichen Emissionen an den Gesamtemissionen steigen.

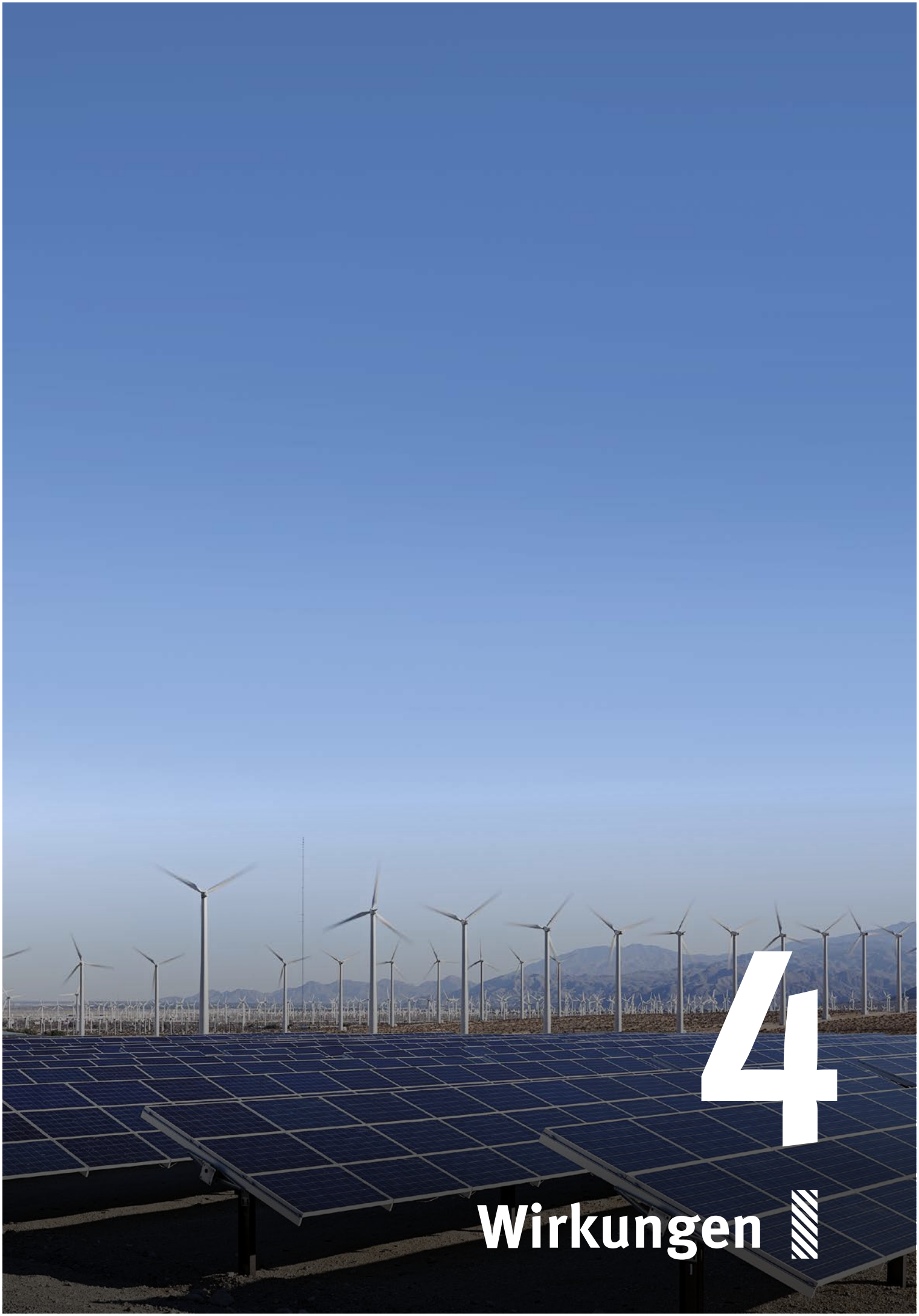
- Mit rein technischen Minderungsmaßnahmen (Effizienzsteigerung, Güllevergärung, etc.) lassen sich die Emissionen um rund 20–25 % senken. Diese sollten daher rasch umgesetzt werden.

- Rund 60 % der landwirtschaftlichen Emissionen stammen aus der Viehhaltung. Der Abbau der Tierbestände spielt daher eine Schlüsselrolle für einen wirksamen Klimaschutz in der Landwirtschaft und Landnutzung. Eine Abstockung der heimischen Tierbestände ist aber nur möglich, wenn sich gleichzeitig die Ernährungsgewohnheiten ändern und der Konsum tierischer Produkte auf eine gesunde Menge, entsprechend der DGE Empfehlungen reduziert wird. Zusätzlich müssen die Fleischexporte reduziert werden.

- Eine Reduktion der Tierbestände – insbesondere erreicht durch eine Abstockung in Regionen mit besonders intensiver Tierhaltung – wäre nicht nur dem Klimaschutz dienlich, sondern hätte darüber hinaus positive Effekte auf Biodiversität sowie auf Luft- und Gewässerqualität. Darüber hinaus würde die Abhängigkeit von Futtermittelimporten verringert und damit der virtuelle Flächenimport reduziert werden.

- Weiterhin sind andere THG-Minderungsmaßnahmen erst durch die Viehreduzierung möglich. Um die trockengelegten Moore wieder zu restaurieren, muss 6,5 % der landwirtschaftlichen Fläche aus der Nutzung genommen oder in Paludikultur umgewandelt werden. Damit können 80 % der Emissionen aus Acker- und Weideland reduziert werden. Ohne die Tierproduktion zu reduzieren, ist dieses Ziel jedoch nur schwierig zu erreichen.

- Eine naturnahe Bewirtschaftung des Waldes ist sowohl für Naturschutz als auch für Klimaschutz und Klimaanpassung notwendig. Um die Kohlenstoffsenke im Wald zu bewahren ist ein Waldumbau dringend notwendig. Der hohe Anteil an Nadelwaldmonokulturen macht den Wald und damit den Kohlenstoffspeicher anfällig für direkte und indirekte Folgen des Klimawandels. Laubmischwälder erhöhen die Resilienz.



4 Wirkungen

4.1 Treibhausgasemissionen

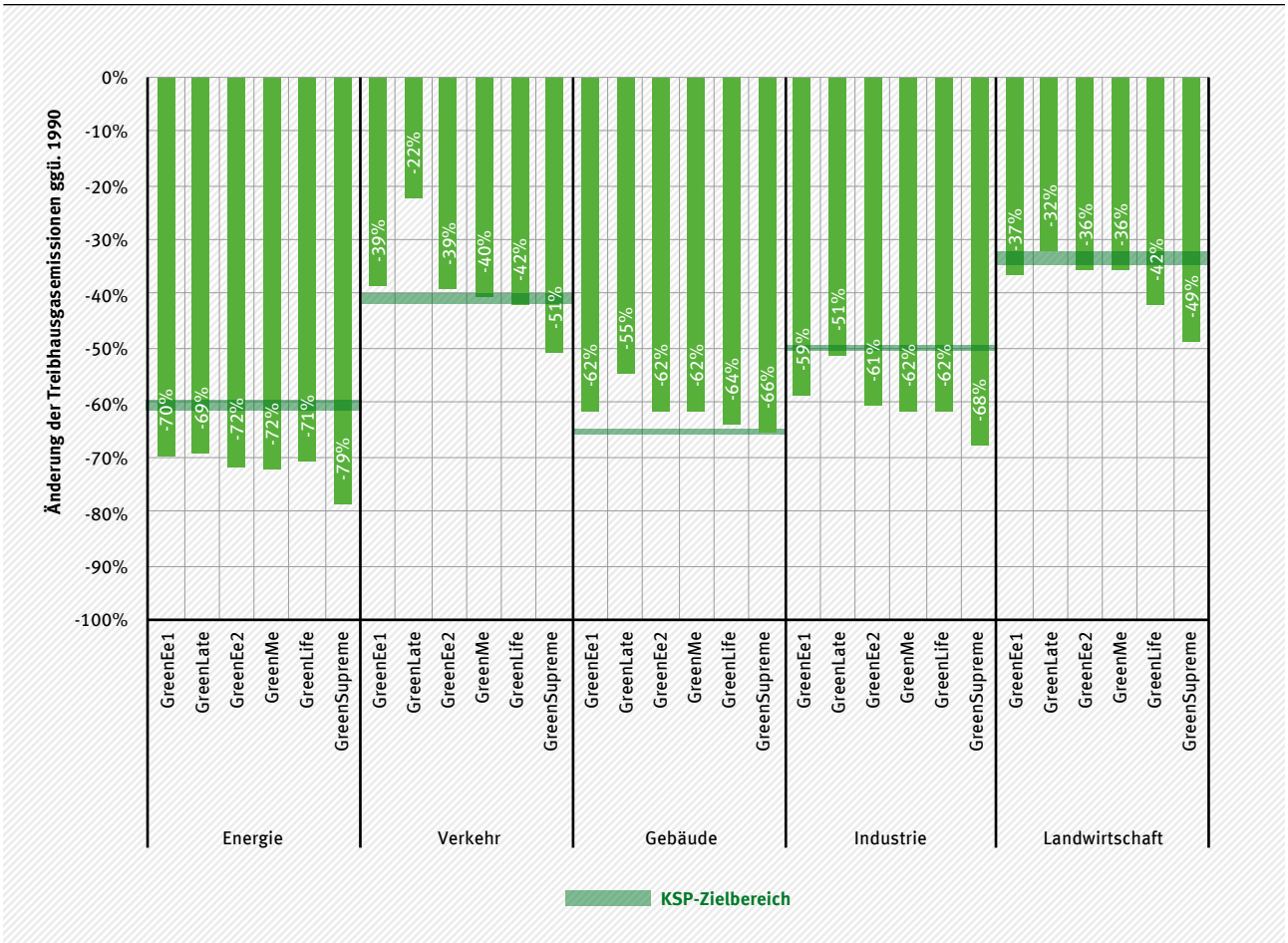
Um den Klimawandel und dessen Auswirkungen zu begrenzen, hat sich die Bundesregierung im Jahr 2010 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber 1990 als nationalen Beitrag zur Einhaltung der Zwei-Grad-Obergrenze zum Ziel gesetzt. Mit dem Klimaschutzplan 2050 (KSP) wurde bis 2030 eine Treibhausgasminderung um 55 % unter das Niveau von 1990, sektorale Beiträge zur Treibhausgasminderung und das übergreifende Handlungsziel einer „weitgehende Treibhausgasneutralität" für Deutschland bis 2050 festgelegt. Trotz des Übereinkommens von Paris in 2015 und dessen ambitionierteren globalen Langfristzielen bestätigte die Bundesregierung den bestehenden Minderungskorridor von 80 bis 95 % bis 2050 gegenüber 1990. Das Umweltbundesamt hat bereits 2016 eine Minderung von 95 % als Maßstab für eine Treibhausgasminderung im Klimaschutzplan gefordert (UBA, 2016c). Mit den im September 2019 vorgelegten „Eckpunkten für das Klimaschutzprogramm 2030" (Bundesregierung, 2019) legt die Bundesregierung „Treibhausgasneutralität" für Deutschland bis 2050 als neues Umwelthandlungsziel fest. Eine Ambitionssteigerung für den Zeithorizont 2030 wird indes nicht vorgenommen. Aus diesem Grund fokussieren alle Green-Szenarien auf eine Minderung bis 2050 von mindestens 95 % gegenüber 1990. Die Green-Szenarien zeigen unterschiedliche Wege dahin auf und haben daher unterschiedliche Wirkungen auf die Erreichbarkeit von nationalen und internationalen Klimaschutzzielen.

4.1.1 2030 – Auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität

Alle Green-Szenarien spannen einen Lösungsraum über alle Emissionsquellgruppen auf. **Trotz der Verfehlung einzelner sektoraler Klimaschutzziele**

Abbildung 25

Treibhausgasminderung der Green-Szenarien im Jahr 2030 in den Sektoren des Klimaschutzplans



Hinweis: Der Sektor Sonstige findet sich im Kapitel 3.5 und ist wegen des vergleichsweise geringen Anteils hier nicht aufgeführt.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

ist das Gesamtminderungsziel bis 2030 in allen Green-Szenarien sicher gewährleistet, insbesondere durch das Voranschreiten der Energiewirtschaft, siehe Abbildung 25. Ausschließlich das GreenLate-Szenario bleibt mit einer Minderung um 55 % gegenüber 1990 bis 2030 im Zielbereich des Klimaschutzplans. Die anderen Szenarien gehen deutlich darüber hinaus. **GreenEe1 erreicht eine Minderung an Treibhausgasemissionen von 60,3 % gegenüber 1990 und GreenEe2, GreenMe sowie GreenLife liegen in einem engen Bereich von 61,4 bis 62,6 %. GreenSupreme weist mit dem Anspruch einer schnellen Treibhausgasminderung bereits 2030 eine Reduktion um 69 % auf.** Insgesamt wird deutlich, dass ein gesteigertes Minderungsniveau gegenüber den bestehenden Zielen der Bundesregierung bis 2030 unter hohen Anstrengungen erreichbar ist. Es sollte im Kontext der internationalen und europäischen Verpflichtungen Deutschlands auch festgelegt und umgesetzt werden.

Energiewirtschaft

In der Energiewirtschaft soll laut KSP bis 2030 eine Minderung um mindestens 61 % gegenüber 1990 auf mind. 183 Mio.t $CO_{2Äq}$ erreicht werden (BMU, 2016). Mit den bis Mai 2019 initiierten Maßnahmen ist eine Minderung auf 263 Mio.t $CO_{2Äq}$ absehbar (BMU, 2019b). In allen Green-Szenarien trägt die Energiewirtschaft überproportional zur Minderung bei, womit ggf. Defizite anderer Sektoren für die Zielerreichung kompensiert werden, siehe Abbildung 25. **Das sektorale KSP-Ziel für die Energiewirtschaft wird in allen Green-Szenarien 2030 sicher erreicht. Bis 2030 werden die Treibhausgasminderungen in der Energiewirtschaft vor allem von dem eingeleiteten Ausstieg und in GreenSupreme vom vollzogenen Ausstieg aus der Kohleverstromung dominiert.** In allen Szenarien wirken weiterhin anspruchsvolle Annahmen zur Reduktion des Endenergiebedarfs in den Anwendungsbereichen.

Verkehr

Der Verkehr ist der einzige Sektor, in dem zwischen 1990 und 2018 nahezu keine Treibhausgasminderungen erreicht wurden. 2018 wurden 163 Mio. t $CO_{2Äq}$ durch Verkehr verursacht. Dabei sind die von Deutschland am internationalen Flug- und Seeverkehr verursachten Emissionen noch nicht mit einbezogen. Bis 2030 sollen die THG-Emissionen der nationalen Verkehre um mind. 40 % gegenüber 1990 auf max. 98 Mio. t $CO_{2Äq}$ gemindert werden (BMU, 2016). Mit den in GreenLate unterstellten Maßnahmen wird das sektorale Ziel 2030 mit nur 22 % Minderung deutlich und in den beiden GreenEe-Szenarien (mit 39 %) knapp verfehlt. In GreenLife und GreenMe kann die Trendwende durch schnell wirkende Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und –verlagerung, die dazu führen, dass die Fahrleistung im motorisierten Individualverkehr zurückgehen, erreicht werden. Auch die ca. 7,5 Mio. E-Pkw tragen weiterhin zu einer starken Minderung der THG-Emissionen in 2030 bei. In **GreenSupreme wird aufgrund** einer stärkeren Verlagerung auf aktive Mobilitätsformen sowie auf den Umweltverbund, eine schnellere Integration der Elektromobilität mit schon im Jahr 2030 gut 12 Mio. E-Pkw im Bestand, und dem Einsatz gewisser Mengen erneuerbarer PtL-Kraftstoffe im Straßenverkehr, eine Minderung um 51 % und damit **eine deutliche Übererfüllung des sektoralen Zieles möglich**.

Gebäude

Im Sektor Gebäude werden die beim Betrieb von Wohn- und Nichtwohngebäuden entstehenden Treibhausgasemissionen betrachtet sowie weitere Treibhausgasemissionen aus dem Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), darunter auch Militär. Bis 2030 soll eine Minderung um mind. 66 % gegenüber 1990 auf maximal 72 Mio. t $CO_{2Äq}$ erreicht werden (BMU, 2016). In allen Szenarien sind der Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Biomasse und insbesondere die Außerbetriebnahme ineffizienter dezentraler Holz-Heiztechniken sowohl vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung als auch aus Gründen der Luftreinhaltung in 2030 bereits stark vorangeschritten. Gegenüber der derzeitigen Politik entfällt dieser als treibhausgasneutral erachtete Brennstoff daher. **GreenSupreme erreicht mit einer THG-Minderung um 65,7 % das sektorale Ziel,** aufgrund sehr ambitionierten Voranschreitens bei der Sanierung und Modernisierung von Gebäuden. Mit THG-Minderungen von 64,2 % verfehlt GreenLife dieses Zwischenziel knapp. **Bis spätestens 2035 erreichen alle Green-Szenarien auch mit dem Ausstiegspfad aus der dezentralen Biomassenutzung die sektoralen Treibhausgasminderungen für 2030**, wobei GreenLate entsprechend der Szenariencharakteristik diese Treibhausgasminderung erst in 2035 erreicht.

Industrie
Sämtliche energiebedingten Treibhausgasemissionen, die durch die direkte Nutzung von Endenergieträgern in der Industrie entstehen sowie die rohstofflichen Treibhausgasemissionen und Treibhausgasemissionen der Produktverwendung fluorierter Gase werden in diesem Sektor berücksichtigt. Diese sollen bis 2030 auf mind. 143 Mio. t $CO_{2Äq}$, also um min. 49 % gegenüber 1990, reduziert werden (BMU, 2016). Das **sektorale Ziel wird in allen Green-Szenarien sicher erreicht** und bis auf GreenLate deutlich übererfüllt. **Wesentlicher Treiber dieser Entwicklung ist eine konsequente Energieeffizienzstrategie**, die insbesondere in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife zum Tragen kommt. Hier werden Minderungen gegenüber 1990 von 59 bis 62 % erreicht. **In GreenSupreme wirkt zusätzlich der bereits eingeleitete Ausstieg aus der Nutzung von Kohle als Brennstoff bis 2040**, dabei werden Minderungen von 68 % erreicht.

Landwirtschaft
Der Sektor Landwirtschaft[29] umfasst neben den Treibhausgasemissionen der Quellgruppe Landwirtschaft auch die direkten Emissionen zum Ausführen des landwirtschaftlichen Betriebs, wie bspw. die Kraftstoffe landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Im Jahr 2016 betrugen die sektoralen Treibhausgasemissionen 71,8 Mio. t $CO_{2Äq}$. Bis 2030 soll eine Minderung um mind. 31 % gegenüber 1990 auf maximal 61 Mio. t $CO_{2Äq}$ erreicht werden (BMU, 2016). **Mit den in den Green-Szenarien unterstellten Maßnahmen wird die sektorale Zielerreichung bis 2030 sicher gewährleistet.** In allen Green-Szenarien wirkt bereits 2030 die veränderte gesündere Ernährung, die sich in den reduzierten Tierbestandszahlen wiederspiegelt. In GreenLife und insbesondere GreenSupreme schreitet dieser gesellschaftliche Wandel schneller voran, so dass diese Szenarien in Kombinationen mit den technischen Maßnahmen bereits 2030 eine Minderung um 42 % und 49 % gegenüber 1990 erreichen

4.1.2 2050 – Treibhausgasneutralität

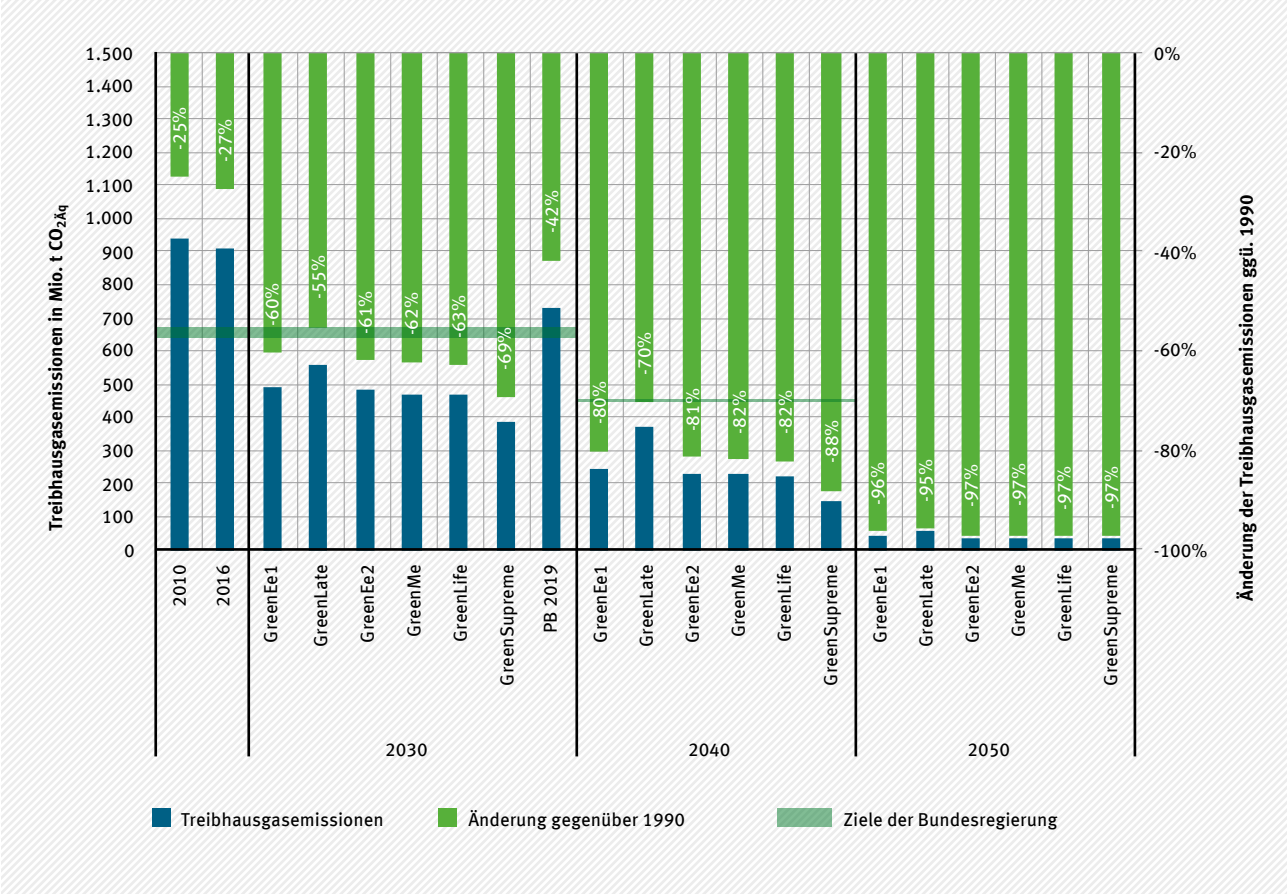
Im weiteren Transformationspfad von 2030 bis 2050 schreiten die einzelnen Green-Szenarien entsprechend ihre Charakteristik weiter voran. GreenLate befindet sich mit einer Treibhausgasminderung um 70 % bis 2040 und 95,4 % bis 2050 auf dem ambitionierten Pfad der Bundesregierungsziele. Alle anderen Green-Szenarien erreichen bereits 2030 eine höhere Treibhausgasreduktion als die Zielvorgaben der Bundesregierung derzeit darstellen, die im Wesentlichen auf dem ambitionierten Voranschreiten der Energiewirtschaft basieren. Bis 2040 verstärkt sich der Unterschied zwischen den anderen Green-Szenarien und GreenLate sowie den Zielen der Bundesregierung weiter. So werden Treibhausgasminderungen in den Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife zwischen 80 und 81,9 % abgebildet. **GreenSupreme erreicht eine Minderung um 80 % bereits 2036 und weist bis 2040 eine Minderung um 88 % gegenüber 1990 auf. Bis 2050 werden THG-Minderungen in GreenSupreme von 97,1 % erreicht.** Die Szenarien GreenEe2, GreenMe und GreenLife liegen mit einer THG-Minderung gegenüber 1990 um 96,7 bis 96,9 % in einem ähnlichen Bereich, siehe Abbildung 26.

Diese Darstellungen umfassen alle Treibhausgasemissionen, die auf die Ziele der Bundesregierung angerechnet werden. Sie stellen jedoch nur einen Teil der national verursachten Emissionen dar. Hinsichtlich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen (im folgenden LULUC), Waldbewirtschaftung und der national verursachten internationalen Verkehre, also im See- und Luftverkehr, sind weitere Treibhausgasemissionen zu berücksichtigen. Der Sektor LULUC weist in allen Green-Szenarien einen Treibhausgasminderungsweg bis 2050 um etwa 86 % gegenüber 1990 auf, siehe Kapitel 3.6. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre werden bis 2050 vollständig vermieden, siehe Kapitel 3.3. Vor diesem Hintergrund verändern sich die Treibhausgasemissionen und die prozentuale Minderung im Vergleich zu den Bilanzrahmen für die Ziele der Bundesregierung nur geringfügig. Deutlich relevanter sind die natürlichen Senken in Verbindung mit einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung, Holznutzung und Flächennutzung. Mit dem Verzicht der energetischen Nutzung von Waldrestholz, den resultierenden freiwerdenden Flächen durch Verzicht auf den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung, freiwerdenden landwirtschaftlichen Flächen durch Reduktion der Tierbestandzahlen wird ergänzend zur Waldbewirtschaftung die natürliche Kohlenstoffsenke gestärkt. In der vorliegenden Studie erfolgten keine Ökosystemberechnungen, so dass nur näherungsweise der Minderungsbeitrag

29 THG-Emissionen und Maßnahmen im Bereich LULUCF sind nicht Gegenstand sektoraler Zuordnung im KSP und werden daher hier nicht betrachtet.

Abbildung 26

Minderungen der Green-Szenarien bis 2050



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

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e und BMU, 2019b

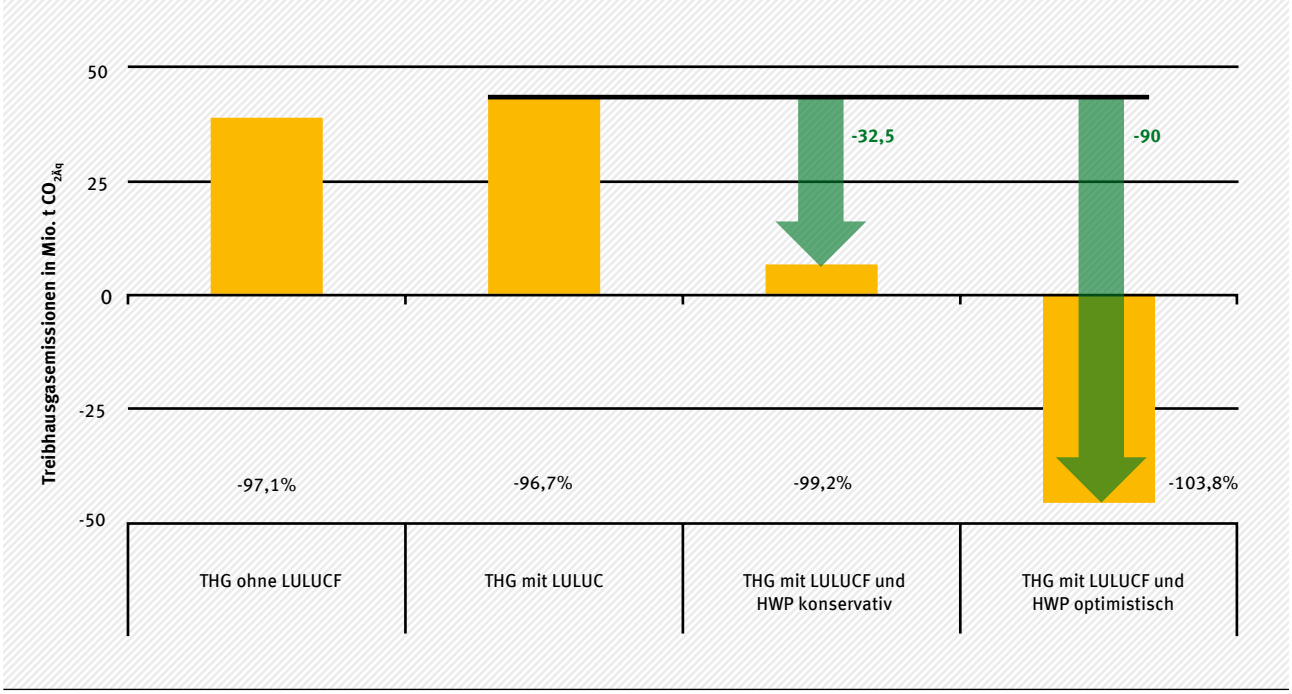
der natürlichen Kohlenstoffsenken auf Basis von verfügbarer Literatur ermittelt werden kann. Konkret kann für den Wald das Naturschutzpräferenzszenario der WEHAM-Szenarien (Oehmichen et al., 2018) hinterlegt werden, mit einem Senkenpotential in 2030 von 29,5 Mio. t $CO_{2Äq}$, 2040 von 28 Mio. t $CO_{2Äq}$ und 2050 von 32,5 Mio. t $CO_{2Äq}$. Die stoffliche und energetische Holznutzung erfolgt jedoch in den Green-Szenarien im geringeren Ausmaß, so dass diese Annahme als konservativ erachtet wird. Eine weitaus optimistischere Annahme wären die Ergebnisse der Greenpeace-Studie „Waldvision“ (Greenpeace, 2018), in der bis 2050 die Kohlenstoffsenke des Waldes auf 90 Mio. t $CO_{2Äq}$ geschätzt wird. Die potentielle Kohlenstoffsenke der freiwerdenden landwirtschaftlichen Flächen konnte in den Green-Szenarien nicht quantifiziert werden. Insgesamt ist daher davon auszugehen, dass die Kohlenstoffsenke des WEHAM-Naturschutzpräferenzszenarios (Oehmichen et al., 2018) in allen Green-Szenarien sicher gegeben ist. Jedoch wird eine Kohlenstoffsenke in der Größe der Waldvision (Greenpeace, 2018) in den Green-Szenarien nicht erreicht.

Für GreenSupreme bedeutet dies, dass die THG-Minderung um 97,1 % bis 2050 durch natürliche Senken weiter gesteigert werden kann. **Werden die nicht vermeidbaren Emissionen aus LULUC und konservativ die Treibhausgasminderung natürlichen Senken berücksichtigt, können in GreenSupreme 2050 die Treibhausgasemissionen vollständig vermieden werden.** Bei einer optimistischen Annahme kann auch eine Reduktion von über 103 % gegenüber 1990 erreicht werden, siehe Abbildung 27.[30]

30 Bei der Berechnung der prozentualen Minderung wurde auch die natürliche Senke im Jahr 1990 berücksichtigt. Konkret mit rund 75 Mio. t $CO_{2Äq}$.

Abbildung 27

Treibhausgasminderung im Zielpunkt für GreenSupreme mit Berücksichtigung von LULUCF



Hinweis: Es werden auch die energiebedingten Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre in der Bezugsbasis berücksichtigt. HWP – Harvested Wood Products.

Quelle: eigene Darstellung und eigene Berechnung auf Basis von UBA, 2020e und Greenpeace, 2018b

Tabelle 9

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

Green-Szenario	Minderung ggü. 1990 ohne LULUCF	Minderung ggü. 1990 mit Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus HWP und LULUCF konservativ	Minderung ggü. 1990 mit Berücksichtigung von Treibhausgasemissionen aus HWP und 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 %

Hinweis: Es werden auch die energiebedingten Treibhausgasemissionen der internationalen Verkehre in der Bezugsbasis berücksichtigt. HWP – Harvested Wood Products.

Quelle: eigene Berechnung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e, Oehmichen et al., 2018 und Greenpeace, 2018

Die ambitionierten Szenarien GreenLife und GreenSupreme können Netto-Null-Emissionen aufgrund einer nachhaltigen land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung sicher erreichen. Selbst GreenLate kann diesem Anspruch nahe kommen, siehe Tabelle 9. **Für die Erreichung nationaler Treibhausgasneutralität ist also kein CCS[31] erforderlich, sondern vielmehr das Stärken natürlicher Senken. Damit können zugleich Synergien zu anderen Umweltherausforderungen, wie der Biodiversität, gehoben werden.**

Alle Green-Szenarien zeigen, dass Treibhausgasneutralität oder weitestgehende Treibhausgasneutralität erreichbar ist. Jedoch führen unterschiedliche Transformationspfade, in deren Verlauf verschiedene Treibhausgasemissionen in Summe verursacht werden, zu diesem Ziel. Diese Unterschiede sind für die auf die Ziele der Bundesregierung angerechneten Treibhausgasemissionen in Tabelle 10 zu sehen. In GreenSupreme werden bis 2050 noch einmal knapp die Hälfte der seit 1990 bis 2015 emittierten Treibhausgasemissionen verursacht. Die Auswirkungen eines verspäteten Handelns werden besonders im Vergleich zu GreenLate offenkundig. Auf dem Weg zur weitestgehenden Treibhausgasneutralität in GreenLate werden rund 4,8 Mrd. t $CO_{2Äq}$, also etwa 37 %, mehr Treibhausgasemissionen als in GreenSupreme ausgestoßen. In den anderen Szenarien werden bereits vor 2040 so viele Treibhausgasemissionen ausgestoßen, wie in GreenSupreme aufsummiert bis 2050 emittiert werden.

Damit wird deutlich, dass zur Begrenzung der kumulierten Treibhausgasemissionen eine geringe Verschärfung der kurzfristigen Zwischenziele nur im begrenzten Maße Wirkung hat. – Vielmehr bedarf es eines schnellen und deutlich ambitionierten Handelns.

4.1.3 2050 – Treibhausgasneutralität im globalen Kontext

Mit dem Übereinkommen von Paris hat die Weltgemeinschaft sich das Ziel gesetzt, die globale Erwärmung deutlich unter 2 °C zu begrenzen und Anstrengungen zu unternehmen, den Temperaturanstieg möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen. Der Sonderbericht des IPCC zum 1,5 °C-Ziel zeigt eindringlich, dass die Risiken für Mensch und Natur bei 2 °C globaler Erwärmung deutlich höher sind als bisher angenommen. Im Sinne des Vorsorgeprinzips und der Nachhaltigkeitsziele sind die notwendigen Klimaschutzmaßnahmen sozial-, wirtschafts- und umweltverträglich schnell zu initiieren. Im IPCC SR1.5 (IPCC, 2018) zeigen 53 Szenarien einen THG-Emissionspfad, der eine globale Erwärmung auf 1,5 °C begrenzt[32]. Auf Basis dieser unterschiedlichen globalen Pfade wird nachfolgend ein Durchschnittspfad

Tabelle 10

Kumulierte Treibhausgasemissionen in den Green-Szenarien* entsprechend der angerechneten Emissionen auf die Ziele der Bundesregierung**

In Mrd. t $CO_{2Äq}$	GreenEe1	GreenLate	GreenEe2	GreenMe	GreenLife	GreenSupreme
von 1990 bis 2015	26,97					
dazu bis 2030	10,54	11,04	10,44	10,37	10,32	9,58
dazu bis 2040	3,61	4,6	3,46	3,39	3,35	2,45
dazu bis 2050	1,39	2	1,28	1,25	1,23	0,84
Summe von 1990 bis 2050	42,51	44,61	42,15	41,98	41,87	39,84

* Es wurde zwischen den Stützjahren vereinfachend eine lineare Entwicklung unterstellt.

** Ohne LULUCF und internationale Verkehre.

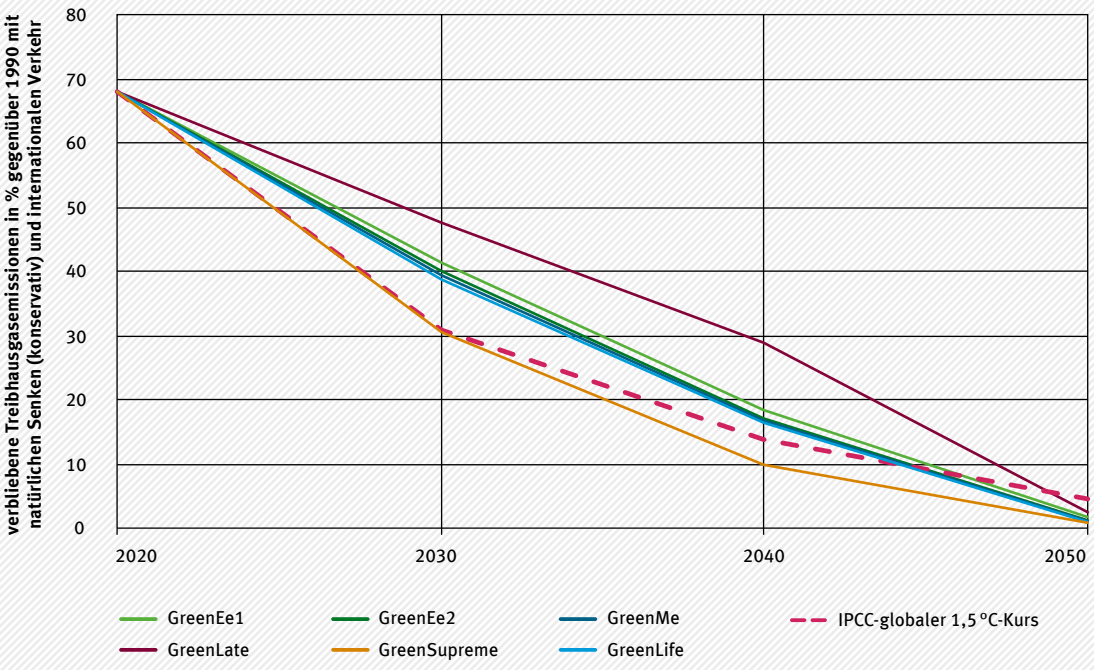
Quelle: UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

31 Carbon, Capture an Storage (CCS) ist in seinen Potentialen begrenzt und mit gewissen Umweltrisiken verbunden und somit weder eine nachhaltige noch eine dauerhafte Option.

32 Die Szenarien im IPCC SR1.5, die als 1,5 °C Szenarien gelten, sind diejenigen, die entweder die Temperatur beständig auf maximal 1,5 °C begrenzen oder die kurzzeitig bis um 0,1 °C das Ziel überschießen und innerhalb einer Dekade auf maximal 1,5 °C stabilisieren.

Abbildung 28

Entwicklung der verbleibenden Treibhausgasemissionen in den Green-Szenarien unter Berücksichtigung von LULUCF (konservativ) und den CO_2-Emissionen der international verursachten Verkehre



Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e und IIASA, 2019

(IPCC-globaler 1,5 °C-Kurs) dargestellt[33] und die Entwicklung der Green-Szenarien dazu beurteilt, siehe Abbildung 28. Dabei stellt dieser globale 1,5 °C-Kurs einen durchschnittlichen Transformationspfad dar, auf den sich in Summe die Weltgemeinschaft und alle von Menschen verursachten Treibhausgasemissionen ungefähr bewegen müssen.[34] Er bedeutet nicht, dass jede einzelne Nation exakt diesen Pfad einhalten muss. In Abbildung 28 wird deutlich, dass **das hohe Ambitionsniveau in GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenLife insbesondere bis 2040 nicht den Anforderungen des durchschnittlichen globalen 1,5 °C-Kurs nach IPCC genügt. Gleichfalls sind die aktuellen Ziele der Bundesregierung und GreenLate bis 2040 weit entfernt von einem hinreichenden Beitrag für die globale Begrenzung auf deutlich unter 2 °C. Green-Supreme hingegen zeigt einen kompatiblen Transformationspfad.**

Zu beachten ist, dass darüber hinaus weitere klimarelevante Emissionen durch den Menschen verursacht werden, die derzeit aus wissenschaftlicher Perspektive noch nicht genau quantifiziert werden können, wie beispielsweise die insgesamt erwärmend wirkenden Nicht-CO_2-Effekte im Luftverkehr. **Daraus resultiert eine zusätzliche, noch nicht quantifizierbare Verschärfung der Reduktionsanforderungen. Damit wird umso deutlicher, dass allein aus dem Vorsorgeprinzip ein schnelles Handeln in allen Bereichen erforderlich ist, um annährend dem globalen Kurs für die Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C gerecht zu werden.**

Mit dem Übereinkommen von Paris besteht auch Einvernehmen darüber, dass wohlhabende(re)n Ländern wie Deutschland eine besondere Bedeutung zufällt (vgl. Artikel 4 (1) ÜvP). Vor dem Hintergrund, dass der Wohlstand und die Wirtschaftsleistung Deutschlands auf treibhausgasintensiven Techniken

33 Diese verschiedenen IPCC-Szenarien zeichnen sich durch einige gemeinsame Eigenschaften aus. Zwei der wichtigsten Eigenschaften der Szenarien, die für den Durchschnittspfad (IPCC-globaler 1,5 °C-Kurs) verwendeten wurden, sind die Entwicklungen der THG-Emissionen bis 2030 sowie bis 2050. In allen 1,5 °C -Szenarien halbieren sich die CO_2 Emissionen bis 2030 im Vergleich zu 2010. Die globalen THG-Minderungsszenarien erreichen eine CO_2-Neutralität bis ca. 2050. Die nicht-CO_2 Gase werden in globalen Szenarien stark reduziert aber nie vollständig vermieden. Dafür werden Sie von Maßnahmen der CO_2-Entnahme soweit ausgeglichen, dass die netto Treibhausgasemissionen nach 2050 sogar unter Null liegen. Der genaue Ablauf der Emissionskurve zwischen heute, 2030 und 2050 variiert innerhalb der globalen IPCC-Szenarien. Je schneller die THG-Minderung, desto weniger sind sogenannte „negative Emissionen" nach 2050 notwendig.

34 Dieser globale Kurs stellt so die durchschnittliche Reduktionsrate der IPCC Szenarien dar, die sich mit keinem oder nur geringem kurzzeitigen Überschreiten bei einem maximalen Temperaturanstieg auf 1,5 °C stabilisieren.

und der Nutzung fossiler Energieträger beruht, sollte Deutschland einen entsprechend ambitionierten Beitrag zur Begrenzung der menschenverursachten Treibhausgasemissionen leisten, siehe auch (Climate Analytics, 2018; Höhne et al., 2019). **Ein Transformationspfad wie GreenSupreme für Deutschland erfordert eine umfassende und schnelle Umsetzung von nationalen Klimaschutzmaßnahmen. Um einem global angemessenen Beitrag Deutschlands so nah wie möglich zu kommen sind allerdings darüber hinaus ambitionierte internationale Kooperation, Finanzierung und Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen außerhalb Deutschlands notwendig.**

4.1.4 Fazit

Die Green-Szenarien zeigen verschiedene Wege hin zur Treibhausgasneutralität auf. Allen gemein sind erhebliche technische Entwicklungen und Innovationen in den nächsten Jahren sowie ein gesellschaftlicher Wandel und tiefes Bewusstsein jedes Einzelnen für nachhaltiges Handeln.

- Um den globalen Herausforderungen zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C annähernd gerecht zu werden, sind die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 in der Größenordnung von mindestens 70 % zu mindern.

- Bis spätestens 2050 ist Treibhausgasneutralität zu erreichen, indem die menschenverursachten Treibhausgasemissionen nach dem jeweiligen Kenntnisstand vermieden und natürliche Senken gestärkt werden.

- Klimaschutzmaßnahmen, die den Ausstoß von menschenverursachten Treibhausgasen mindern, müssen schnell, prioritär und deutlich ambitionierter als bisher ergriffen werden.

- Für eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Entwicklung ist der Verzicht auf die Nutzung fossiler Energieträger in allen Bereichen unausweichlich und muss schnellstmöglich umgesetzt werden.

- Eine nachhaltige land- und forstwirtschaftliche Flächennutzung ermöglicht auf natürlichem Wege, der Atmosphäre CO_2 zu entnehmen. Parallel zu Treibhausgasminderungsmaßnahmen sind diese natürlichen Potentiale zu heben.

- Für die Erreichung nationaler Treibhausgasneutralität ist CCS nicht erforderlich, vielmehr das Stärken natürlicher Senken, womit Synergien zu anderen Umweltherausforderungen, wie der Biodiversität, gehoben werden können.

- Klima- und Ressourcenschutz im alltäglichen Denken und Handeln ist die Basis einer nachhaltigen Entwicklung. Eine Änderung des täglichen Konsumverhaltens ist notwendig, um den Druck auf die natürlichen Ressourcen zu entlasten.

- Deutschland sollte neben den nationalen Klimaschutzaktivitäten zusätzlich international darauf hinwirken, dass auch andere Staaten bis spätestens 2050 treibhausgasneutral werden. Ergänzend sind Maßnahmen zu ergreifen, um globale Treibhausgasminderungen durch finanzielle, technologische Hilfen und Wissenstransfer zu unterstützen. Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger und der Schutz und Ausbau der natürlichen Senken sollte dabei im Fokus stehen.

- In Deutschland in Verkehr gebrachte Produkte (auch importierte Produkte) sollten hohen Anforderungen an Treibhausgasemissionen inklusive Vorkette und Materialeffizienz gerecht werden und so auch den globalen Wandeln zu Klima- und Ressourcenschutz anreizen.

4.2 Rohstoffe

Für die Green-Szenarien wird mit Hilfe der gesamtwirtschaftlichen Materialflussrechnung (economy-wide material flow accounts = EW-MFA) eine Übersicht über die aggregierten Stoffströme in die deutsche Volkswirtschaft (inländische Primärrohstoffentnahme, Importe und Input von inländischen Sekundärmaterialien) sowie Exporte ins Ausland ermittelt (UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e). Als Indikator wird **schwerpunktmäßig** der **RMC (Raw Material Consumption)**[35] betrachtet, welcher die Primärrohstoffnutzung für den inländischen Konsum und die Investitionen („Primärrohstoffkonsum“) abbildet. Der RMC unterteilt sich in die Rohstoffkategorien Biomasse, fossile Energieträger,

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

nicht-metallische Mineralien und Metalle. Die Rohstoffinanspruchnahme der international gehandelten Güter wird in sogenannten „Rohstoffäquivalenten“ (RME) berechnet, um Rohstoffextraktionen im In- und Ausland vergleichbar darzustellen. Rohstoffäquivalente sind die Menge der Primärrohstoffe, die für ein im- oder exportiertes Produkt gebraucht wird. Zusätzlich werden ausgewählte rohstoffspezifische Betrachtungen unternommen.

4.2.1 Entwicklung des Primärrohstoffkonsum

Die Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland hat erhebliche Auswirkungen auf die Rohstoffinanspruchnahme. Wichtige Faktoren zur Reduktion des Primärrohstoffkonsums umfassen u.a. die vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien und dem damit verbundene Wegfall der Nachfrage nach fossilen Energieträgern. Weitere wichtige Faktoren sind Strukturpolitiken wie die Reduktion der Ausweisung von Siedlungsflächen, Energieeinsparungen, der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen, die Optimierung von Verarbeitungsprozessen durch Materialsubstitutionen und Materialeffizienzsteigerungen sowie Lebensstiländerungen. In allen Szenarien wird eine Erhöhung der Materialeffizienz und Entwicklung des technologischen Stands in und außerhalb Europas angenommen (Kapitel 2).

Im Ausgangsjahr 2010 liegt Deutschlands Primärrohstoffkonsum inklusive Vorleistungen im Ausland bei 1,37 Mrd. t. und wird mengenmäßig dominiert durch nicht-metallische Mineralien und fossile Rohstoffe, siehe Abbildung 29.

Bereits im GreenLate-Szenario findet – mit einer Verzögerung im Vergleich zu den anderen Szenarien – neben der Erschließung von Energieeffizienzpotentialen über alle Anwendungsbereiche hinweg auch eine kontinuierliche Fortsetzung einer anspruchsvollen Ressourcenschonungspolitik inkl. eines verstärkten Einsatzes von Sekundärrohstoffen und Materialsubstitution sowie erste Umstellungen hin zu nachhaltigeren Lebensstilen[36] statt. Daraus resultiert, dass der Rückgang im RMC in GreenLate bis 2050 bereits -56 % im Vergleich zu 2010 beträgt. Zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Materialeffizienz sowie eine gesteigerte Energieeffizienz (GreenEe2 + Materialeffizienz), ergänzt durch eine zunehmende Realisierung nachhaltiger Lebensstile[37], haben das Potential, den Materialkonsum um weitere -12 % zu senken (GreenMe). Diese beinhalten u.a. die Ausschöpfung des ökologisch-technischen Recyclingpotenzials, deutlich ausgeprägter Materialsubstitution im Vergleich zu GreenLate und der Einsatz innovativer Materialien wie Textilbeton sowie verstärkter Holzbau. Zusätzlich wird angenommen, dass auch global zusätzliche Anstrengungen zur Erhöhung der Materialeffizienz wie in Deutschland getroffen werden und somit sich auch in den mit den Importen verbundenen Produkten eine ambitionierte Ressourcenschonungspolitik niederschlägt. Darüber hinausgehende ambitionierte Lebensstiländerungen wie raumeffizientes Bauen und eine damit einhergehend gegenüber heute reduzierte Pro-Kopf-Wohnfläche, die Bevorzugung langlebiger und reparaturfähiger Produkte und die hauptsächliche Nutzung von Gütern im Rahmen von Sharingangeboten (GreenLife), sowie ein schnellerer und noch ambitionierterer Umbau des Energiesystems verbunden mit einer Befreiung vom Wirtschaftswachstum, ermöglichen es, eine Reduktion des Materialkonsums um weitere -2 % bis 2050 zu erreichen (GreenSupreme).

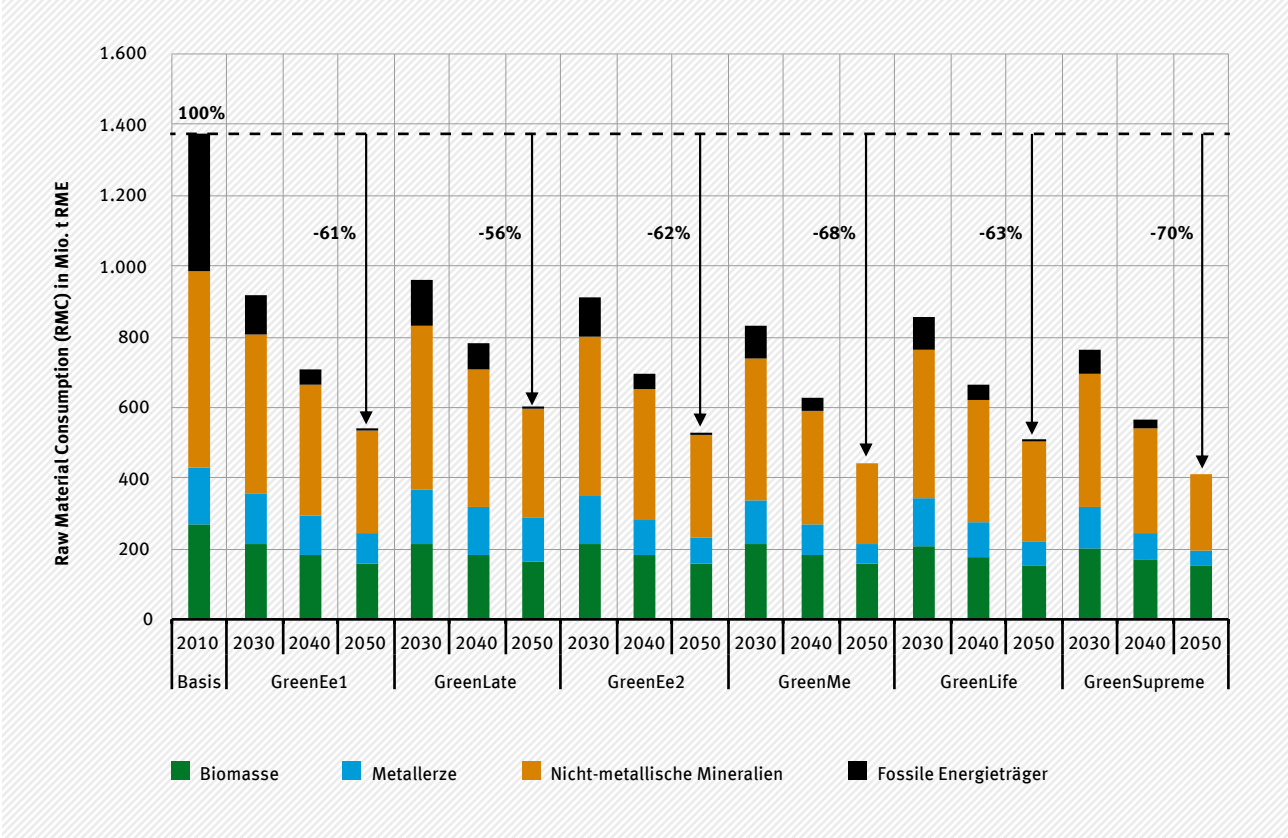
Mit dem Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger in allen Szenarien, geht anteilig die größte Reduktion des Rohstoffbedarfs einher. Neben der Umstellung der Energieversorgung vollständig auf erneuerbare Energien, sinkt bis 2050 auch die rohstoffliche Nutzung von fossilen Rohstoffen, wie z.B. Naphtha. Langlebige Produkte der chemischen Industrie werden bereits ab 2030 mit erneuerbaren strombasierten Ausgangsstoffen via PtG/PtL-Routen hergestellt. Im Jahr 2050 verbleibt in den Szenarien GreenEe1, GreenLate, GreenEe2 und GreenLife nur noch eine geringe Menge an fossilen Rohstoffen (ca. 5,5 bis 8,1 Mio. t.). Ursächlich hierfür ist die Annahme einer verzögerten Umstellung auf erneuerbare Energien im Rest der Welt auch für Importe nach Deutschland (Footprint-Perspektive). In den Szenarien GreenMe und GreenSupreme wird bis 2050 auch

36 Da im GreenLate-Szenario der Fokus auf technischen Maßnahmen liegt, sind nur einige Aspekte nachhaltigerer Lebensstile in diesem Szenario einbezogen, insbesondere die Reduktion des Fleischkonsums und die Ansätze zur Verkehrswende durch Vermeidung und Verlagerung. Diese finden allerdings aufgrund einer späteren Umstellung zeitverzögert im Vergleich zu den anderen Szenarien statt.

37 Hierzu zählt beispielsweise auch die im Vergleich zu GreenLate geringere Wohnfläche oder eine stärkere Änderung des persönlichen Mobilitätsverhaltens.

Abbildung 29

Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffkategorien in den Green-Szenarien



Hinweis: Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

global ein Ausstieg aus den fossilen Energieträgern angenommen, wodurch die fossilen Energieträger im RMC bis 2050 vollständig entfallen.

Der Einsatz von **nicht-metallischen Mineralien** (Sand, Kies, Kalkstein, etc.) betrug im Jahr 2010 etwa 0,56 Mrd. t (41 % des RMC). Ihr Konsum sinkt in allen Szenarien und liegt in einem Bereich von 0,22 Mrd. t in GreenSupreme bis 0,31 Mrd. t in GreenLate in 2050 u.a. aufgrund der deutlich verringerten Nutzung von Baumineralien im Bausektor (vgl. Kapitel 3.2). Insbesondere die Annahmen zur Entwicklung der Wohnfläche und zur Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlungen und Verkehr in allen Szenarien auf 0 ha/Tag bis 2050 (vgl. Kapitel 3.2) haben relevante Auswirkungen. Ebenso sind die szenariospezifischen Annahmen zum Sekundärrohstoffeinsatz, zur Materialsubstitution (z.B. verstärkter Holzeinsatz und Textilbeton) und der Materialeffizienzsteigerung von Bedeutung.

Die in den Szenarien angenommenen Umstellungen der Ernährung, insbesondere der verringerte Fleischkonsum in Verbindung mit einem reduzierten Tierbestand (Kapitel 3.6), trägt wesentlich zum Rückgang der **Biomassenutzung** von 266 Mio. t in 2010 auf 150 (GreenLife und GreenSupreme) bis 163 Mio. t (GreenLate) in 2050 bei. So bewirken die Annahmen im GreenEe1-Szenario zum Bevölkerungsrückgang einen um 24 Mio. t verringerten Biomassebedarf für Nahrungsmittel und die gesündere Ernährung einen Rückgang des RMC um ca. 42 Mio. t bis 2050. Auch der Verzicht auf den Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung nach 2030 (Kapitel 3.6) trägt zum Rückgang der Biomassenutzung bei (62 Mio. t in GreenSupreme bis 54 Mio. t in GreenLate) in 2050. Umgekehrt erhöhen die Annahmen zum zunehmenden Holzbau in allen Green-Szenarien außer GreenLate sowie die Substitution von abiotischen Materialien vor allem durch Holz (z.B. Dämmstoffe) den Biomassebedarf, insbesondere in GreenMe und GreenSupreme. Dieser Effekt nimmt jedoch aufgrund

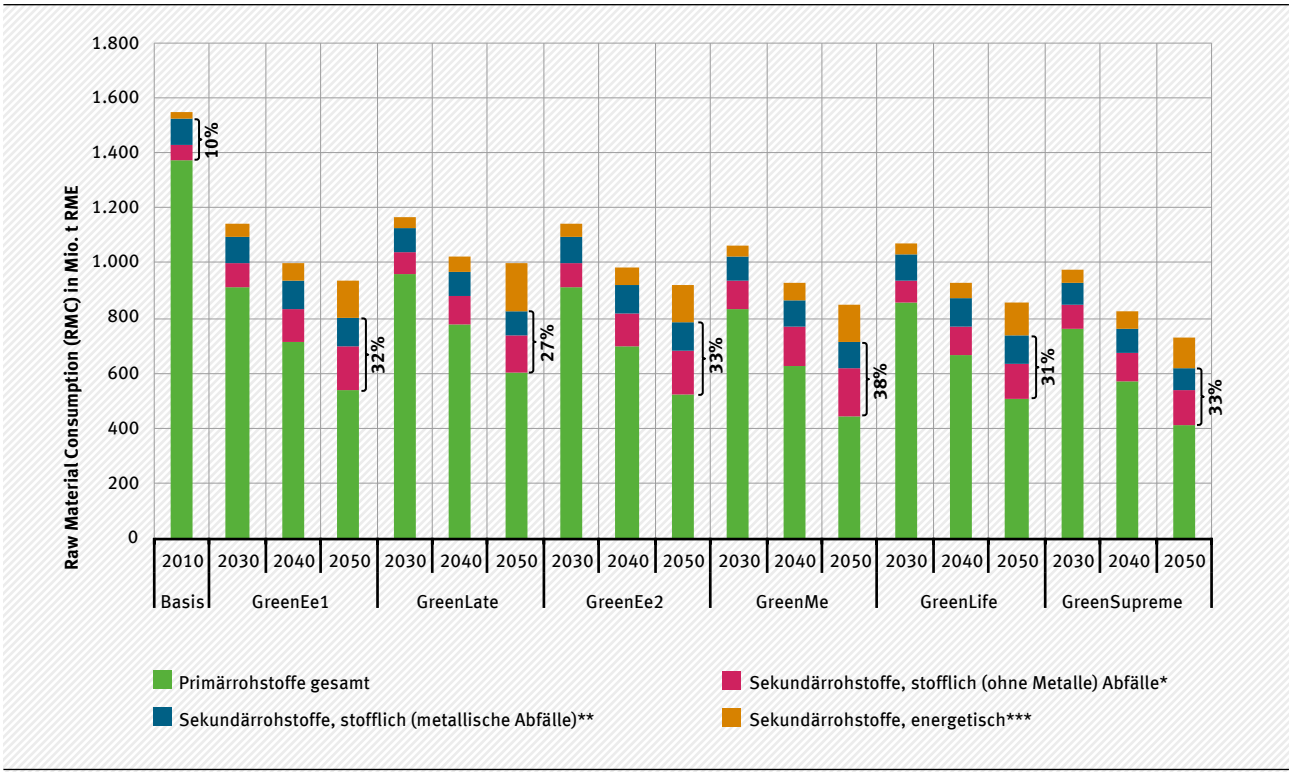
der unterstellten Wohnflächenentwicklungen und der damit verbundenen Neubauaktivitäten nach 2030 kontinuierlich ab (Kapitel 3.2).

Zu den wesentlichen Rohstoffen, welche für den Umbau hin zu einer treibhausgasneutralen und ressourceneffizienten Volkswirtschaft benötigt werden, gehören **Metalle** und ihre Verbindungen. Beispielsweise werden Eisen und Stahl für Infrastrukturen und energieeffiziente Gebäude benötigt, Kupfer und Aluminium in Stromleitungen, Elektrofahrzeugen und erneuerbare Energieerzeugungsanlagen. Eine ganze Anzahl an speziellen Technologiemetallen sind zentraler Bestandteil zukünftiger Technologien, z.B. in Batterien (Lithium, Kobalt, Graphit), Magneten für Generatoren (Seltene Erden), als Legierungsmetalle (Nickel, Niob, Beryllium, Kobalt, Gallium, etc.) und in elektronischen Geräten und Anlagen (z.B. Tantal in Kondensatoren, Silizium in Photovoltaikanlagen). In den Szenarien senkt sich die Inanspruchnahme von Metallerzen von 162 Mio. t in 2010 auf 124 Mio. t (GreenLate) bis 43 Mio. t (GreenSupreme) in 2050 (Reduktion um -24 % bis -74 %). Dabei reduziert sich die Inanspruchnahme bis 2030 durch den Mehrbedarf an metallischen Rohstoffen für den Umbau der Volkswirtschaft nur um rund -4 % bis -29 %, wohingegen 2040 bereits eine Reduktion um -16 % bis -53 % erreicht wird. Im GreenLate Szenario verzögert sich der Umbau und nimmt erst nach 2030 Fahrt auf.

Der **Primärrohstoffkonsum pro Person** im Jahr 2010 betrug in Deutschland 16,8 Tonnen pro Person und lag damit über dem globalen Durchschnitt von 11,1 Tonnen pro Person (UNEP, 2019b). In den Green-Szenarien wird eine Reduktion des RMC auf 5,7 (GreenSupreme) bis 8,4 Tonnen pro Person (GreenLate) im Jahr 2050 erreicht. Alle Szenarien, bis auf GreenLate, erreichen somit in 2050 den in der Literatur diskutierten Korridor einer nachhaltigen Rohstoffinanspruchnahme von 5 bis 8 Tonnen/Kopf/Jahr (Bringezu, 2015; IRP, 2014; Lehmann (Ed.), 2018; UNEP, 2011). Der Vergleich zeigt, dass

Abbildung 30

Inländischer Materialkonsum in RME und Anteil an Sekundärmaterialien in den Green-Szenarien



* Holz, Papier, Kunststoffe und mineralische Abfälle zur Verwertung im Hoch- und Tiefbau, ohne Abfälle, die direkt auf der Baustelle verwertet wurden (sog. closed loops).

** Eisen-, Kupfer-, Aluminiumschrotte

*** Tonnen Rohöläquivalente (theoretischer Wert um Substitutionseffekte zu quantifizieren)

Hinweis: Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e

ein vergleichsweise geringer Primärrohstoffkonsum in Deutschland in 2050 auf einem hohen technologischen und Wohlstands-Niveau möglich sein kann.

4.2.2 Zirkularität der deutschen Volkswirtschaft

Ein wichtiger Gradmesser für die Zirkularität einer Volkswirtschaft ist die Höhe des Anteils an Sekundärmaterialien am gesamten Materialeinsatz der Volkswirtschaft und dem Einsatz einzelner relevanter Materialien. Der Anteil an Sekundärmaterialien für inländischen Konsum und Investitionen in RME im Basisjahr 2010 für Deutschland betrug etwa 11 % (Abbildung 30). Davon entfallen rund 10 % auf die stoffliche Verwertung von Sekundärmaterialien und 1 % auf die energetische Nutzung zur Substitution fossiler Energieträger. Diese 11 % entsprechen rd. 175 Mio. t Primärrohstoffen, um welche der RMC ohne die inländische Sekundärrohstoffwirtschaft und ohne Rezyklatgehalte in den Importen erhöht wäre.

Dies entspricht der Systematik des Indikators DIERec (Direct and Indirect Effects of Recovery), welcher die Schonung von Primärrohstoffen durch Kreislaufführung beschreibt. Er bildet ab, in welchem Umfang Primärrohstoffe unter Annahme gleicher Produktionsmuster und Technologien global gewonnen werden müssten, wenn keine Verwertung von Sekundärrohstoffen erfolgen würde (UBA, 2019g).

Im Zeitverlauf steigt der Anteil der durch Sekundärrohstoffe substituierten oder eingesparten Primärrohstoffe am Materialkonsum in RME deutlich an. Zum einen werden in den Szenarien höhere Verwertungsquoten und Rezyklatgehalte in einigen Materialströmen angenommen (siehe RESCU-Studie UBA, 2019f). Dies gilt gleichermaßen für den Rest der Welt und die von dort nach Deutschland exportierten Güter. Zum anderen sinkt der inländische Primärrohstoffkonsum deutlich. Durch die stoffliche Nutzung von Sekundärrohstoffen kann 2050 der inländische Materialkonsum in RME im Umfang von 27 % in GreenLate bis 38 % in GreenMe vermieden werden. Der stärkere Recyclinganteil in GreenMe im Vergleich zu GreenSupreme beruht auf einem geringeren Gesamtbedarfs an Materialien im GreenSupreme-Szenario. Werden auch energetische Verwertungen berücksichtigt, so steigt dieser Anteil auf 40 % bis 48 %.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, dass Deutschland unter Annahme sehr ambitionierter Recyclingvorgaben weltweit und reduzierter Nachfrage nach Materialien ein sehr viel höheres Maß an Zirkularität im Jahr 2050 erreichen kann[38]**.** Relativ wird dies bereits durch den Ausstieg aus der energetischen Nutzung fossiler Energieträger erreicht, wodurch der inländische Primärrohstoffkonsum am signifikantesten sinken wird. Dennoch sind auch in 2050 aufgrund von Wachstumseffekten und Güter- und Materialverweilzeiten im anthropogenen Lager (Lanau et al., 2019; UBA, 2017b), funktionalen Verlusten, Downcycling und dissipative Verwendungen auch weiterhin Primärrohstoffinputs erforderlich bleiben (Mayer et al., 2019). Letztere lassen sich zwar minimieren, aber sind technologisch und thermodynamisch nicht gänzlich zu vermeiden (Cullen, 2017).

4.2.3 Übersicht über ausgewählte Einzelrohstoffe

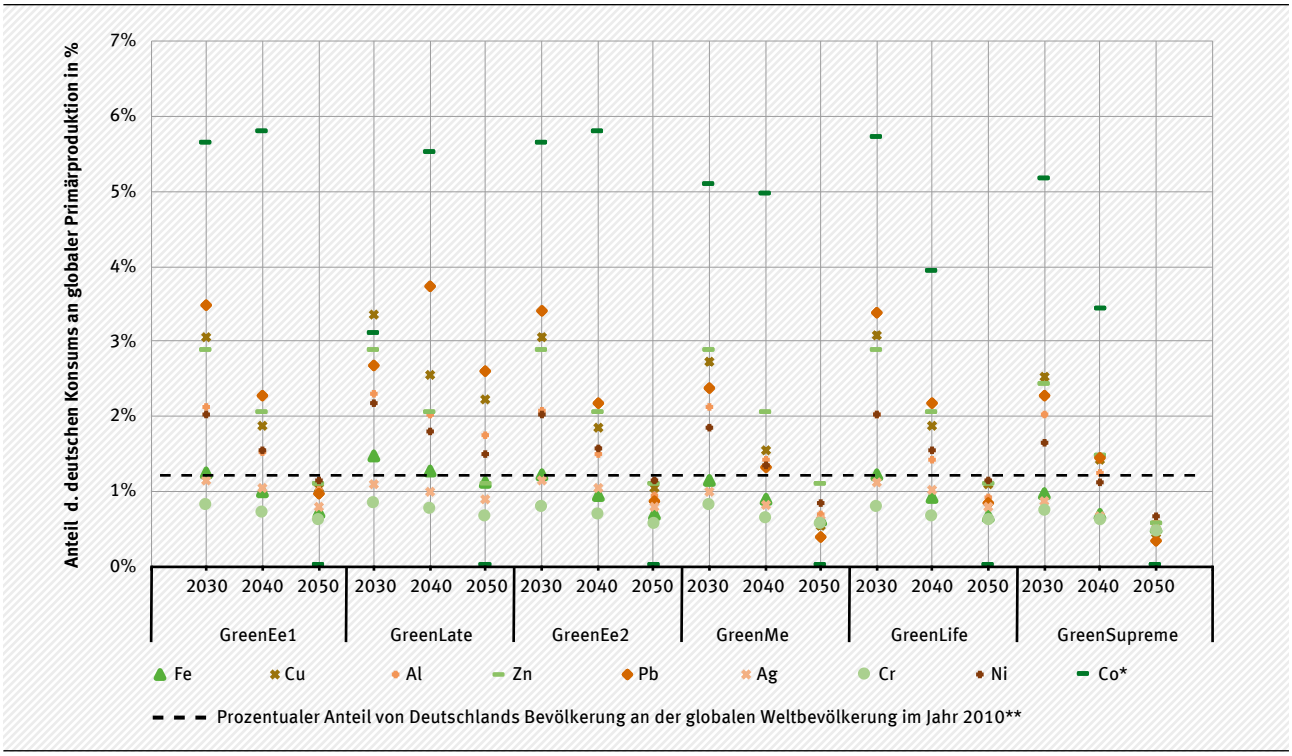
Der Konsum Deutschlands nach einzelnen Materialien ist in Abbildung 31 mit der globalen Primärproduktion im Jahr 2015/2016 (je nach Datenverfügbarkeit) verglichen.

Deutschlands Rohstoffkonsum für die Metalle Eisen (Fe), Chrom (Cr), Silber (Ag) und Nickel (Ni) in den Jahren 2030 bis 2050 liegt im Vergleich zur aktuellen globalen Produktion bei rund 0,5 % bis 2 %. Dies entspricht in etwa auch Deutschlands Anteil an der globalen Bevölkerung (gestrichelte Linie). Für Kupfer (Cu), Aluminium (Al), Zink (Zn) und Blei (Pb) ist Deutschlands Konsum an Primärrohstoffen mit ca. 1 % bis 4 % der globalen Produktion in 2015/16 leicht darüber. Der Konsum von Primärkobalt (Co) für Batterien hingegen wird in den Jahren 2030 und 2040 auf etwa 3 % bis 6 % der aktuellen globalen Produktion geschätzt und liegt damit deutlich über dem gegenwärtigen Anteil Deutschlands an der globalen Bevölkerung. Auch die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) nimmt an, dass die Nachfrage nach Kobalt sich in den nächsten Jahrzehnten weiter erhöhen könnte (bis zu global 120.000 Tonnen im Jahr 2035 werden allein für wachstumsstarke Zukunftstechnologien veranschlagt, was 90 % der Weltproduktion 2013 entspricht, Marscheider-Weidemann et al., 2016). In den Green-Szenarien beträgt die jährliche letzte inländische Verwendung von Kobalt bis zu 7.287 Tonnen pro Jahr in 2040

38 Dabei bleibt zunächst außer Betracht, ob insbesondere bei auch global ambitionierten Recyclingvorgaben ausreichend Sekundärmaterialien entsprechend der Nachfrage und zum entsprechenden Zeitpunkt verfügbar sind.

Abbildung 31

Anteil der letzten inländischen Verwendung (LIV) ausgewählter Materialien in 2030, 2040 und 2050 in Prozent an der globalen Produktion 2015/2016.



* Bedarf nur für Batterien in Mobilität berücksichtigt.

** Deutschlands Bevölkerung im Jahr 2010 lag bei 81,75 Mio. Personen und die globale Bevölkerung bei 6,96 Milliarden Personen (81,75 Millionen Personen / 6,96 Milliarden =1,17 %).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e. Globale Produktionsdaten vom US Geological Survey für das letzte verfügbare Jahr (USGS, 2019). Für Chrom wurden die Bergbaustatistiken für Chromit herangezogen und ein Metallgehalt von 30 % angenommen.

(GreenEe1 und GreenEe2) und könnte damit einen beachtlichen Anteil an der globalen Primärproduktion (126.000 Tonnen in 2016 (Metallgehalt)) ausmachen.

Für **Lithium (Li)** liegt die globale Primärproduktion in 2016 bei ca. 26.000 Tonnen (Li-Gehalt) (USGS, 2016). Lithium wird aktuell vorwiegend in Australien, Chile und Argentinien gefördert. In den Green-Szenarien wird bis zum Jahr 2050 eine Zunahme der Nutzung von Lithium-Akkus im Verkehrsbereich unterstellt (Abbildung 32)[39].

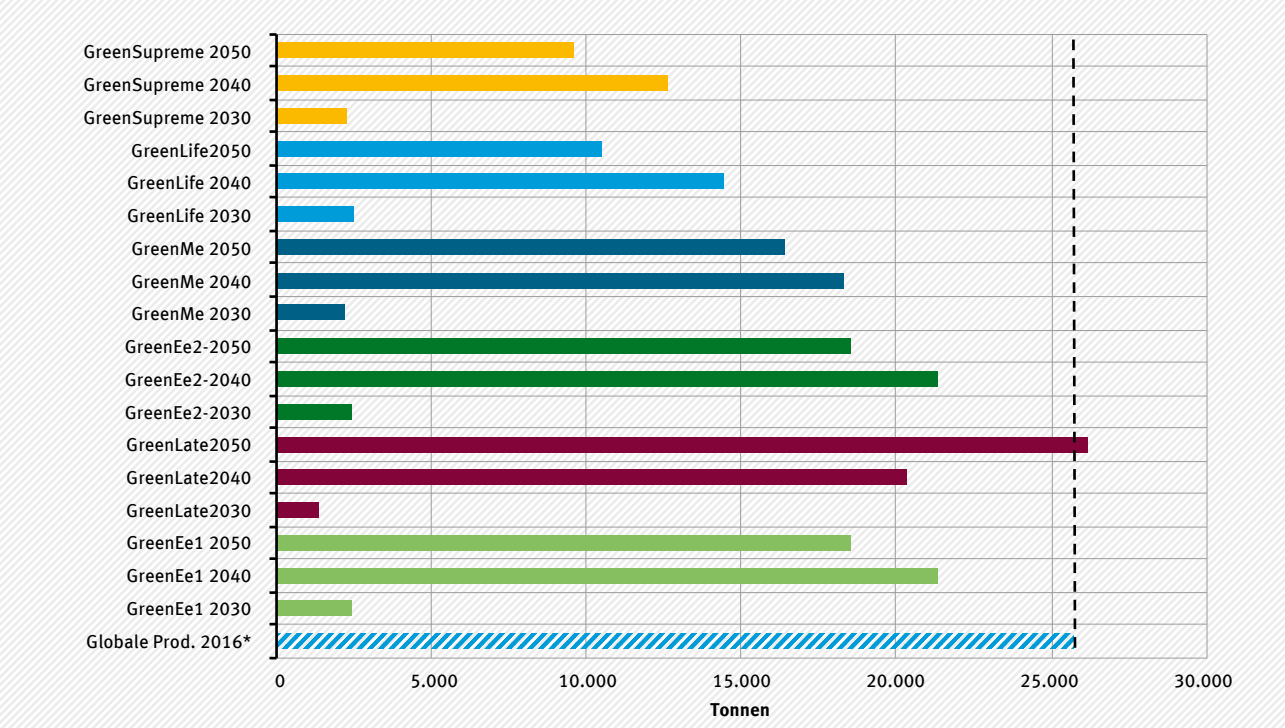
Im Jahr 2050 beträgt die Nachfrage nach Lithium für in Deutschland genutzte Li-Ionen Akkus ca. 9.600 in GreenSupreme bis 26.200 Tonnen pro Jahr in GreenLate. Dies entspricht einem Anteil von 37 % bis 102 % der momentanen global geförderten Menge an Lithium. Unter der Annahme, dass der Rest der Welt sich ähnlich wie Deutschland entwickelt, würde dies einen enormen Ausbau an Produktionskapazitäten für Lithium erfordern und wahrscheinlich nicht global übertragbar sein. Auch die DERA nimmt an, dass der globale Bedarf an Lithium im Jahr 2035 allein für eine Auswahl betrachteter Zukunftstechnologien (Li-Ionen Akkus und Airframe-Leichtbauten) bei bis zu 110.000 Tonnen liegen könnte (Marscheider-Weidemann et al., 2016).

Nicht berücksichtigt ist in den Abschätzungen in den Green-Szenarien jedoch die Nutzung von Sekundärlithium z.B. durch die mögliche Rückgewinnung aus Fahrzeugbatterien in der Zukunft. In den Szenarien werden second-life-Batterien als Speicher im Energiesektor unterstellt, so dass die Mengen an Lithium in 2050 noch weitestgehend im Bestand gebunden sind. Zusätzlich sind aktuell Recylingkonzepte für Fahrzeugbatterien in der Entwicklung, so dass keine Abschätzungen zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen getroffen werden konnten. Es ist aber davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren entsprechende Konzepte und Anlagen Marktreife erreichen werden und somit der Bedarf teilweise auch durch

39 Es handelt sich hierbei um eine Sonderrechnung nur für Lithium in Batterien, d.h. andere Nutzungspfade (z.B. Keramik und Glas, Schmierfette, etc.) wurden nicht mit betrachtet.

Abbildung 32

Letzte inländische Verwendung von Lithium in Batterien (Sonderrechnung) im Vergleich zu globalen Produktionsdaten (in Metallgehalt) im Jahr 2016.



* Globale Produktionsdaten für 2016 stammen vom US Geological Survey (USGS, 2016) (ohne USA). Produktionszahlen für Lithiummineralien und –Salzlake wurde in Metallgehalt umgerechnet basierend auf Graedel et al., 2015.

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von UBA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e.

Sekundärmaterialien gedeckt werden kann. Eine weitere Einschränkung der oben präsentierten Abschätzungen der Rohstoffbedarfe für Lithium und Kobalt ist, dass nur die Nutzung in Fahrzeugbatterien berücksichtigt wurde. Die Nachfrage nach diesen Rohstoffen in anderen Anwendungen könnte den Bedarf für beide Rohstoffe weiter erhöhen.

Auch wenn die zahlreichen in den Green-Szenarien berücksichtigten Umwelttechnologien aus heutiger Sicht konsistent für Deutschland sind, so könnte ihr tatsächlicher weltweiter Ausbau sich unter Berücksichtigung von Substitutionstechnologien (UBA, 2019h), die heutzutage noch nicht marktreif sind, oder die sich noch gar nicht abzeichnen, deutlich anders gestalten. Folglich sind auch die extrapolierten Bedarfe 2050 für einzelne Rohstoffe im Gegensatz zu den Materialklassen und –kategorien mit wesentlich größeren Unsicherheiten behaftet. Sie können jedoch dazu beitragen, Problemlagen hoher Rohstoffkritikalität frühzeitig aufzuzeigen.

4.2.4 Entwicklung der Rohstoffproduktivität bis 2050

In allen Szenarien sinkt die Rohstoffinanspruchnahme (RMC und RMI[40]) im Zeitverlauf bis 2050 ab (siehe RESCUE-Studie, UBA 2019f)). Gleichzeitig führt ein kontinuierlich steigendes Wirtschaftswachstum um ca. 0,7 % jährlich (alle Szenarien bis auf GreenSupreme ab 2030) zu einer Erhöhung des Bruttoinlandsprodukts und somit der Gesamtrohstoffproduktivität[41]. Mit einer jahresdurchschnittlichen Steigerung von 2,3 % bis 3.0 % über alle Szenarien hinweg, ist somit die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRess II (BMUB, 2016) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung, 2018). Auch im GreenSupreme Szenario, in welchem von 2020 bis 2030 das durchschnittliche Wirtschaftswachstum auf null

40 RMI: Raw Material Input. Der RMI erfasst alle inländischen Rohstoffentnahmen sowie alle Einfuhren angegeben in Rohstoffäquivalenten (RME).

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

abnimmt und ab 2030 eine Wachstumsbefreiung angenommen wird, steigt die (Gesamt-)Rohstoffproduktivität aufgrund des anhaltenden Rückgangs des Primärrohstoffeinsatzes auch im Zeitraum 2030 bis 2050 weiterhin im Jahresdurchschnitt um 2,6 % an.

4.2.5 Fazit

Die Green-Szenarien zeigen, dass Deutschland seinen Rohstoffbedarf durch eine Kombination von Energie- und Materialeffizienzmaßnahmen, Lebensstiländerungen und dem Umbau zu einem erneuerbaren Energiesystem ohne fossile Rohstoffe bis 2050 um bis zu 70 % reduzieren kann. Allerdings geht diese Umstellung auch mit einer Mehrinanspruchnahme von einzelnen Rohstoffen einher und dies konnte nur zum Teil quantifiziert werden. Vor dem Hintergrund einer global gerechten Rohstoffnutzung sollte deshalb ein möglichst ambitionierter Transformationspfad analog GreenSupreme verfolgt werden. Um dies zu erreichen sind folgende Aspekte umzusetzen:

- Die konsequente Schließung von Materialkreisläufen im Rahmen der technischen Potenziale ist neben dem Ausstieg aus den fossilen Energien eine der größten Stellschrauben zur Reduktion des RMC und sollte deutlich ambitionierter als bisher gefördert werden. Langfristig muss allerdings auch der Nettobestandszuwachs des anthropogenen Lagers insgesamt abnehmen, da ansonsten der steigende Rücklauf an Sekundärmaterialien durch Wachstumseffekte stets überkompensiert wird.

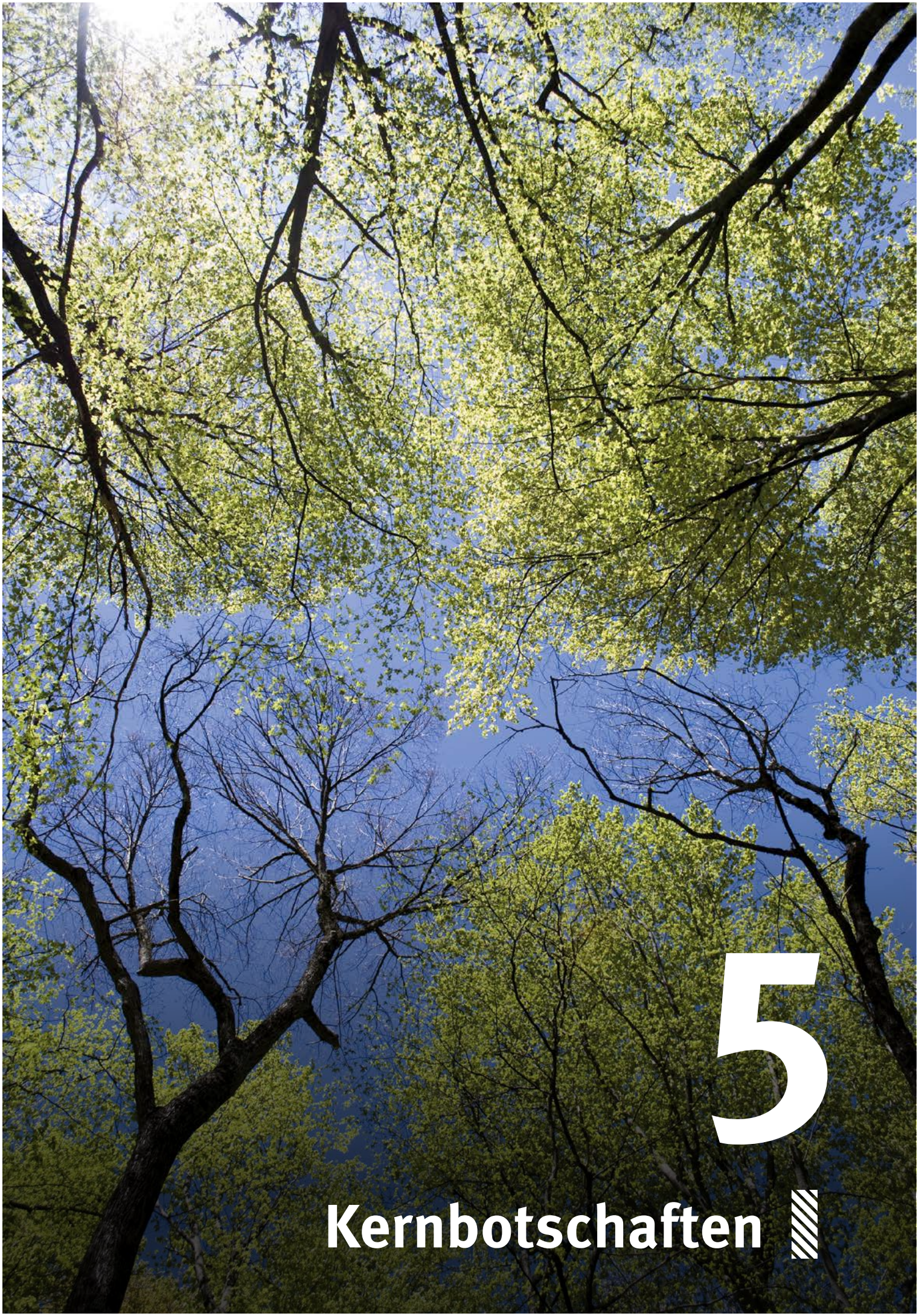
- Die aus Klimaschutzperspektive notwendigen technologischen Änderungen wie der Aufbau des erneuerbaren Energiensystems oder die Umstellung der Stahlerzeugung wirken sich mittel- bis langfristig auch positiv auf einen reduzierten Bedarf an Primärrohstoffen aus. Die Ressourcenpolitik sollte daher neben der Förderung von Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz auch Maßnahmen für technologische Änderungen fördern und forcieren.

- Die Annahme, dass auch andere Länder eine ambitionierte Klima- und Ressourcenschutzpolitik verfolgen, ist zentral für das Gelingen im Inland. Aufgabe der deutschen Ressourcenschonungspolitik sollte es daher auch sein, die notwendigen Transformationen der Handelspartner aktiv zu unterstützen.

- Im den Green-Szenarien wird eine globale Übertragbarkeit der Entwicklungen in Deutschland implizit angenommen, aber der damit verbundene Rohstoffbedarf nicht explizit quantifiziert. Dies erfordert einen breiten Technologiemix, welcher die Nachfrage auf eine breite Rohstoffbasis verteilt. Dies spricht für eine offene Forschungsausrichtung bei der Entwicklung neuer Technologien, insbesondere auch mit Blick auf Technologie- und Wissenstransfer, um Beiträge zu passgenauen Lösungen auch außerhalb Deutschlands leisten zu können.

- Um Versorgungsrisiken zu mindern und einen tiefgreifenden Ausbau der Umwelttechnologien weltweit zu gewährleisten, werden verstärkt Substitutionstechnologien zur Anwendung kommen müssen, um die entsprechenden Technologierohstoffe zu ersetzen. Aufgrund der langen Vorlaufzeiten in der Entwicklung und bei der Marktdiffusion sind regelmäßig aktualisierte und fortgeschriebene Substitutionsroadmaps wie sie das Umweltbundesamt vorschlägt, wichtige Instrumente zur Ausrichtung der Industriepolitik.

- Neben der Steigerung der Rohstoffeffizienz stellt das konsequente Hinterfragen unseres Konsumverhaltens eine wichtige Stellschraube für Reduktion des Primärrohstoffkonsums dar. Die deutsche Ressourcenschonungspolitik sollte daher nachhaltigen Konsum auf Basis des Nationalen Programms für nachhaltigen Konsum ambitioniert und verstärkt voranbringen.



5 Kernbotschaften

Die RESCUE-Studie zeigt, dass Treibhausgasneutralität in Deutschland bei gleichzeitiger Reduktion der Primärrohstoffinanspruchnahme durch ambitioniertes Handeln möglich ist. Die sechs Green-Szenarien verdeutlichen, dass auf allen Ebenen gemeinschaftlich ambitioniert und auf einander abgestimmt vorangeschritten werden muss, um einen nachhaltigen Klima- und Ressourcenschutz zu erreichen. Es reicht dabei nicht aus, dass nur die technischen Möglichkeiten zur Treibhausgasminderung und Reduzierung des Rohstoffkonsums genutzt werden. Es bedarf vielmehr einer breiten Kombination an Strategien zur Substitution, Vermeidung sowie zur Nutzung natürlicher Senken für eine Minderung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre.

Für einen erfolgreichen Klimaschutz müssen natürliche Senken stärker genutzt werden. Sie stellen jedoch keinen Ersatz für Substitution und Vermeidung dar. Natürliche Senken, also nachhaltige land- und fortwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung, bieten schon heute die Möglichkeit einer nachhaltigen CO_2-Entnahme aus der Atmosphäre und ermöglichen Synergien zu weiteren Herausforderungen in der Umweltpolitik, bspw. der Biodiversitätsschutz. Für eine vollständige Treibhausgasneutralität Deutschlands müssen diese natürlichen Senken künftig stärker genutzt werden. Auf technische Senken in Form von CCS kann und sollte verzichtet werden. Alle hier vorgestellten Szenarien verfolgen einen Mix aus Strategien zur Substitution, Vermeidung und Senken jedoch im unterschiedlichen Ausmaß und Handlungsfeld spezifisch.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass für einen angemessenen Beitrag Deutschlands zur Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf 1,5 °C und für eine global gerechte Rohstoffnutzung sehr hohe nationale Anstrengungen entsprechend dem GreenSupreme-Szenario nötig sind. Je früher und ambitionierter gehandelt wird, desto ausgewogener ist die Balance zwischen den Strategien Substitution, Vermeidung und Senken für die Gestaltung von Klima- und Ressourcenschutz. **Hierfür müssen global und national die richtigen Weichen ohne weitere Verzögerungen in den nächsten Jahren gestellt werden.** Im Klimaschutz wird andernfalls ein Punkt überschritten, jenseits dessen das Ziel der Treibhausgasneutralität nicht mehr rechtzeitig erreicht werden kann.

Für eine Entwicklung Deutschlands, die sich am Klima-Übereinkommen von Paris orientiert, sind die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um mindestens 70 % zu mindern. Nur geringe Verschärfungen der kurzfristigen Treibhausgasminderungsziele (2030) in Deutschland haben keine signifikante Wirkung auf die notwendige Begrenzung der kumulierten Treibhausgasemissionen. Deutschland wäre damit nicht in der Lage, einen angemessenen Beitrag zu den globalen Herausforderungen der Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5 °C zu leisten. Die aktuellen Politiken und Zielsetzungen der Bundesregierung reichen noch nicht aus, dass Deutschland seiner Verantwortung gerecht wird.

Die Wechselwirkungen zwischen Klima- und Ressourcenschutz erfordern ein übergreifendes Denken und integriertes Handeln. Alle Szenarien dieser Studie vollziehen den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energien in allen Bereichen, also Strom, Brennstoffe, Kraftstoffe und Rohstoffe. Der technisch mögliche schnelle Ausstieg aus der Kohleverstromung ist mit hohen vorteilhaften Wirkungen bei der Begrenzung der Treibhausgasemissionen und einer Senkung der Rohstoffinanspruchnahme verbunden und daher anzustreben. Der zeitweise Mehrbedarf an Rohstoffen zur Transformation des Energiesystems kann durch einen Technologiemix und entsprechende technologische Entwicklungen zur Substitution und Vermeidung verringert werden.

Der Ausstieg aus der Kohleverstromung sollte bis 2030, der vollständige Ausstieg aus der Kohlenutzung (also auch Wärme und Rohstoff in der Industrie) sollte bis spätestens 2040 erfolgen. Auf die Nutzung fossiler Energieträger sollte bis spätestens 2050 vollständig verzichtet werden. Um dies zu ermöglichen sind in allen Produktions- und Konsumbereichen die richtigen Weichen zu stellen. Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen erforderlichen technologischen Entwicklungen zur Substitution und Vermeidung von treibhausgas- und materialintensiven Prozessen und Produkten sind zu etablieren und der Ausbau der hierfür erforderlichen Infrastrukturen ist entsprechend ambitioniert anzugehen.

Ein gesellschaftliches Umdenken ist notwendig, um ein umweltbewussteres Handeln sowohl bei der Nachfrage als auch beim Angebot sicherzustellen. Hierfür sind politisch die erforderlichen ordnungsrechtlichen, sozialen und ökomischen Rahmenbedingungen zu schaffen sowie bildungspolitische Maßnahmen zu ergreifen.

Seitens der Politik bedarf es eines klaren Bekenntnisses zu einer ambitionierten Klima- und Ressourcenschutzpolitik. Es müssen nicht nur ambitionierte Ziele im Klima- und Ressourcenschutz gesetzt werden, sondern es muss der Rahmen dafür geschaffen werden, dass diese auch sicher erreicht werden. Damit wird Planbarkeit für alle Akteure auf allen gesellschaftlichen Ebenen gewährleistet. Ergänzend sind entsprechende europäische und internationale Entwicklungen erforderlich, die sich am Übereinkommen von Paris und der Agenda 2030 orientieren müssen. So bedarf es insbesondere der Verankerung von Ressourcenschonung in bi- und multilateralen Abkommen (z.B. Rohstoffpartnerschaften, Handelsabkommen etc.) sowie der Vereinbarung von international verbindlichen Zielen zur Rohstoffinanspruchnahme bzw. Rohstoffeffizienz.

Deutschland muss Maßnahmen ergreifen, um globale Treibhausgasminderungen und eine Minderung der Rohstoffinanspruchnahme durch finanzielle, technologische Hilfen und Wissenstransfer zu unterstützen. Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger sowie der Schutz und Ausbau der natürlichen Senken sollte dabei im Fokus stehen. In Deutschland in Verkehr gebrachte Produkte (auch importierte Produkte) sollten hohen Anforderungen an geringen Treibhausgasemissionen und der Materialeffizienz, bezogen auf die gesamte Lieferkette, gerecht werden, um so auch den globalen Wandel zu Klima- und Ressourcenschutz zu stärken.

Es muss jetzt breit gehandelt werden, und jeder Beitrag, sowohl in Produktion als auch im Konsum ist wichtig. Wenngleich aktuelle Trends, politische Entscheidungen und gesellschaftliche Diskussionen die RESCUE- Studie als sehr ambitioniert erscheinen lassen, so zeigen sie eindrücklich, dass **Klima- und Ressourcenschutz integriert umgesetzt werden kann und muss.** Dafür müssen alle Möglichkeiten genutzt werden und die erforderlichen Maßnahmen unverzüglich eingeleitet werden.

6 Literatur

BMU (2012). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin. Download unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf (Zugriff am 19.09.2017)

BMU (2016). Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Download unter: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf (Zugriff am 19.09.2017)

BMU (2019a). Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung". Download unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/A/abschlussbericht-kommission-wachstum-strukturwandel-und-beschaeftigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Zugriff am 09.04.2019)

BMU (2019b). Projektionsbericht 2019 für Deutschland gemäß Verordnung (EU) Nr. 525/2013. Berlin. Download unter: https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art04-13-14_lcds_pams_projections/projections/envxnw7wq/Projektionsbericht-der-Bundesregierung-2019.pdf (Zugriff am 01.04.2019)

BMU (2019c). Überblick zum Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Download unter: https://www.bmu.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen-tourismus/ressourceneffizienz/deutsches-ressourceneffizienzprogramm/ (Zugriff am 12.09.2019)

BMUB (2016). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin. Download unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf (Zugriff am 02.07.2019)

BMWi (2010). Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin. Download unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Zugriff am 29.05.2019)

BMWi (2019). Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi. Berlin. Download unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt-xls.html (Zugriff am 16.07.2019)

Bringezu, S. (2015). Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources. Resources, 4(1).

Bundesregierung (2002). Perspektiven für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin. Download unter: https://www.nachhaltigkeit.info/media/1326188329phpYJ8KrU.pdf (Zugriff am 02.07.2019)

Bundesregierung (2018). Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018. Berlin. Download unter: https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1546450/65089964ed4a2ab07ca8a4919e09e0af/2018-11-07-aktualisierung-dns-2018-data.pdf?download=1 (Zugriff am 13.09.2019)

Bundesregierung (2019). Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030. Fassung nach Klimakabinett. Berlin. Download unter: https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1673502/855f58eed07bcbbd697820b4644e83a7/2019-09-20-klimaschutzprogramm-data.pdf?download=1 (Zugriff am 26.09.2019)

Climate Action Tracker (2019). Addressing global warming. Download unter: https://climateactiontracker.org/global/temperatures/ (Zugriff am 23.05.2019)

Climate Analytics (2018). Wissenschaftlich begründeter Kohle-Ausstiegspfad für Deutschland im Einklang mit der 1,5 °C Erwärmungsgrenze des Pariser Klima-Abkommens. Chance und Nutzen einer beschleunigten Energiewende. Download unter: https://climateanalytics.org/media/deutsch_extended_executive_summary_final.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

Cullen, J. (2017). Circular Economy: Theoretical Benchmark or Perpetual Motion Machine? Journal of Industrial Ecology, 21(3), 483-486.

DGE (2017). Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE. Bonn. Download unter: https://www.dge-medienservice.de/allgemeine-ernaehrungsempfehlungen/vollwertig-essen-und-trinken-nach-den-10-regeln-der-dge-poster.html (Zugriff am 13.09.2019)

Difu (2019). Was ist eigentlich Flächenkreislaufwirtschaft? Difu-Berichte 4/2006. Berlin. Download unter: https://difu.de/node/4976 (Zugriff am 12.09.2019)

EK (2010). Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Brüssel. Download unter: https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2010-2020-europe-2020 (Zugriff am 02.07.2019)

EK (2011). Energy Roadmap 2050. COM(2011) 885 final. Brüssel. Download unter: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A52011DC0885&from=EN (Zugriff am 02.07.2019)

EK (2018). Ein sauberer Planet für alle. Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft. COM(2018) 773 final. Brüssel. Download unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=COM%3A2018%3A773%3AFIN (Zugriff am 02.07.2019)

EK (2019a). Circular Economy. Implementation of the Circular Economy Action Plan. Download unter: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm (Zugriff am 12.09.2019)

EK (2019b). Emissions Database for Global Atmospheric Research Download unter: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/ (Zugriff am 12.09.2019)

EP & Rat der Europäischen Union (2002). Beschluss Nr. 1600/2002/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juli 2002 über das sechste Umweltaktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft. (1600/2002/EG). Brüssel. Download unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32002D1600 (Zugriff am 12.09.2019)

FNR (2019). Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Download unter: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf (Zugriff am 29.05.2019)

Fraunhofer IEE (2016). SCOPE. Sektorenübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems. Kassel. Download unter: https://docplayer.org/36664799-Scope-co-2-waerme-strom-verkehr.html#download_tab_content (Zugriff am 12.09.2019)

Graedel, T., Harper, E., Nassar, N., Nuss, P. & Reck, B. (2015). Criticality of metals and metalloids. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(14), 4257.

Greenpeace (2018). Wenn Wälder wieder wachsen. Eine Waldvision für Klima, Mensch und Natur Hamburg. Download unter: https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s02061_greenpeace_studie_waldvision.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

Grünberg, J., Nieberg, H. & Schmidt, T. G. (2010). Treibhausgasbilanzierung von Lebensmitteln (Carbon Footprints): Überblick und kritische Reflektion. Landbauforschung = Applied agricultural and forestry research : journal of applied research in agriculture and forestry, 60(2), 53-72.

Hatfield-Dodds, S., Schandl, H., Newth, D., Obersteiner, M., Cai, Y., Baynes, T., . . . Havlik, P. (2017). Assessing global resource use and greenhouse emissions to 2050, with ambitious resource efficiency and climate mitigation policies. Journal of Cleaner Production, 144, 403-414.

Höhne, N., Emmrich, J., Fekete, H. & Kuramochi, T. (2019). 1,5 °C: Was Deutschland tun muss. Verden/Aller. Download unter: https://newclimate.org/wp-content/uploads/2019/03/Deutschland_1.5_Web.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

ifeu (2019a). Gebäudemodell (GEMOD). Download unter: https://www.ifeu.de/methoden/modelle/gebaeudemodell/ (Zugriff am 12.09.2019)

ifeu (2019b). TREMOD. Download unter: https://www.ifeu.de/methoden/modelle/tremod/ (Zugriff am 12.09.2019)

ifeu (2019c). URMOD. Download unter: https://www.ifeu.de/methoden/modelle/urmod/ (Zugriff am 12.09.2019)

ifeu, IEE, F. & Consentec (2018). Wert der Effizienz im Gebäudesektor in Zeiten der Sektorenkopplung. Studie im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin. Download unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/Heat_System_Benefit/143_Heat_System_benefits_WEB.pdf (Zugriff am 12.09.2019)

IIASA (2019). IAMC 1.5 °C Scenario Explorer. International Institute for Applied Systems Analysis. Download am 12.09.2019 unter: https://db1.ene.iiasa.ac.at/IPCCSR15DB/dsd?Action=htmlpage&page=welcome

IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn. Download unter: https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services (Zugriff am 12.09.2019)

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf. Download unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf (Zugriff am 02.07.2019)

IPCC (2018). Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Download unter: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf (Zugriff am 02.07.2019)

IRP (2014). Managing and conserving the natural resource base for sustained economic and social development – A reflection from the International Resource Panel on the establishment of Sustainable Development Goals aimed at decoupling economic growth from escalating. Download unter: http://www.resourcepanel.org/file/244/download?token=OHRPH1MH (Zugriff am 19.09.2017)

Lanau, M., Liu, G., Kral, U., Wiedenhofer, D., Keijzer, E., Yu, C. & Ehlert, C. (2019). Taking Stock of Built Environment Stock Studies: Progress and Prospects. Environmental Science & Technology, 53(15), 8499-8515.

Lehmann (Ed.), H. (2018). Factor X. Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources. Cham: Springer.

Mancini, L., Vidal Legaz, B., Vizzarri, M., Wittmer, D., Grassi, G. & Pennington, D. (2019). Mapping the Role of Raw Materials in Sustainable Development Goals. A preliminary analysis of links, monitoring indicators, and related policy initiatives. Luxemburg. Download unter: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112892/sustainable_development_goals_report_jrc112892.pdf (Zugriff am 06.09.2019)

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L., Angerer, G., . . . Benecke, S. (2016). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. Studie im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) Berlin. Download unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/dera-rohstoffinformationen-2016.pdf?__blob=-publicationFile&v=6 (Zugriff am 13.09.2019)

Mayer, A., Haas, W., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Nuss, P. & Blengini, G. A. (2019). Measuring progress towards a circular economy: a monitoring framework for economy-wide material loop closing in the EU28. Journal of Industrial Ecology, 23(1), 62-76.

OECD (2019). Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences Paris. Download unter: https://www.oecd.org/environment/global-material-resources-outlook-to-2060-9789264307452-en.htm (Zugriff am 06.09.2019)

Oehmichen, K., Klatt, S., Gerber, K., Polley, H., Röhling, S. & Dunger, K. (2018). Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse. Braunschweig. Download unter: https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Oehmichen_Die_alternativen_WEHAM-Szenarien_2018.pdf (Zugriff am 09.09.2019)

Ritthoff, M., Hanke, T., Bienge, K., Teubler, J., Saurat, M. & Bahn-Walkowiak, B. (2015). Synergien und Zielkonflikte zwischen Ressourcen- und Klimaschutz – Identifizierung von technischen Innovationen, systemischen Lösungen, Maßnahmen und Instrumenten an den Beispielen „Photovoltaik“ und „Gebäudesanierung“. unveröffentlichter Forschungsbericht des Wuppertal Instituts im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., . . . Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. Nature, 461(7263), 472-475.

Statistisches Bundesamt (2015). Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Download unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/_inhalt.html (Zugriff am 09.04.2019)

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., . . . Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223), 1259855.

UBA (2013). Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/globale_landflaechen_biomasse_bf_klein.pdf (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2014). Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change 07/2014. Dessau-Roßlau. Download unter: http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0 (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2015). Postfossile Energieversorgungsoptionen für einen treibhausgasneutralen Verkehr im Jahr 2050: Eine verkehrsträgerübergreifende Bewertung. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 30/2015. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_30_2015_postfossile_energieversorgungsoptionen.pdf (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2016a). Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 72/2016. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

UBA (2016b). Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf (Zugriff am 09.10.2019)

UBA (2016c). Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung – Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klimaschutzplan_2050_der_bundesregierung_0.pdf (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2016d). Klimawandel. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/weltweite-temperaturen-extremwetterereignisse-seit#Chronik (Zugriff am 29.05.2019)

UBA (2017a). Die Stadt für Morgen: Umweltschonend mobil – lärmarm – grün – kompakt – durchmischt. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/20170505_stadt_von_morgen_2_auflage_web.pdf (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2017b). Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

UBA (2018a). Indikator: Gesamtrohstoffproduktivität. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/indikator-gesamtrohstoffproduktivitaet (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2018b). Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 29/2018. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-11_texte_29-2018_deteress.pdf (Zugriff am 11.09.2019)

UBA (2019a). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28_cc_23-2019_nir-2019_0.pdf (Zugriff am 02.07.2019)

UBA (2019b). Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten- 2. Auflage mit methodischen Anpassungen und Teilneuberechnung in Kapitel 2 und 3. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf (Zugriff am 06.09.2019)

UBA (2019c). Emissionsdaten. TREMOD. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#textpart-1 (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2019d). Indikator: Nationaler Wohlfahrtsindex. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/indikator-nationaler-wohlfahrtsindex (Zugriff am 12.09.2019)

UBA (2019e). Pressemitteilung Nr. 09/2019. Klimabilanz 2018: 4,5 Prozent weniger Treibhausgasemissionen [Pressemitteilung]. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/klimabilanz-2018-45-prozent-weniger

UBA (2019f). RESCUE – Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Dessau-Roßlau. Download unter: www.uba.de/rescue

UBA (2019g). Stoffstromorientierte Sekundärrohstoffwirtschaft. Indikatoren Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sekundaerrohstoffwirtschaft-indikatoren#textpart-1 (Zugriff am 13.09.2019)

UBA (2019h). Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 03/2019. Dessau-Roßlau. Download unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-01-14_texte_03-2019_subskrit_abschlussbericht.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

UBA (2019i). Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Climate Change. Dessau-Roßlau.

UBA (2019j). Umweltschonender Luftverkehr: lokal – national – internal. Texte. Dessau-Roßlau.

UBA (2020a). Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenEe Climate Change 01/2020. Dessau-Roßlau.

UBA (2020b). Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenLate. Climate Change 02/2020. Dessau-Roßlau.

UBA (2020c). Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenMe. Climate Change 03/2020. Dessau-Roßlau.

UBA (2020d). Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenLife. Climate Change 04/2020. Dessau-Roßlau.

UBA (2020e). Transformationsprozess zum treibhausgasneutralem und ressourcenschonendem Deutschland – GreenSupreme. Climate Change 05/2020. Dessau-Roßlau.

UNEP (2011). Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Nairobi. Download unter: https://www.resourcepanel.org/file/400/download?token=E0TEjf3z (Zugriff am 12.09.2019)

UNEP (2019a). Global Resources Outlook. 2019: Natural Resources for the Future We Want. Download unter: https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook (Zugriff am 16.09.2019)

UNEP (2019b). UN Environment International Resource Panel Global Material Flows Database. Download am 09.04.2019 unter: http://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database

UNFCCC (2015). Paris Agreement. Paris. Download unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (Zugriff am 02.09.2019)

USGS (2016). Lithium. Download unter: https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/lithium/myb1-2016-lithi.pdf (Zugriff am 13.09.2019)

USGS (2019). Minerals Yearbook – Metals and Minerals. Download unter: https://www.usgs.gov/centers/nmic/minerals-yearbook-metals-and-minerals (Zugriff am 13.09.2019)

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2019). Statistiken. Download unter: https://www.stahl-online.de/index.php/statistiken/3/ (Zugriff am 13.09.2019)

▸ **Diese Broschüre als Download**
bit.ly/2dowYYI

www.facebook.com/umweltbundesamt.de
www.twitter.com/umweltbundesamt