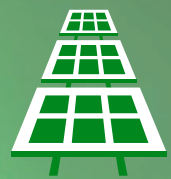
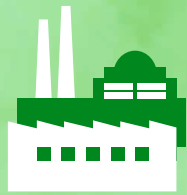


# Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten



**-95%**

*Treibhausgasemissionen*



bis **2050**



**-60%**

*Inanspruchnahme von Rohstoffen*



# Impressum

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06813 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

**Autoren:**

Jens Günther, Harry Lehmann, Ullrich Lorenz und Katja Purr

**sowie**

Wolfgang Butz, Ulrike Döring, Eric Fee, Reinhard Herbener, Tim Hermann, Katja Hofmeier, Kai Kessler, Guido Knoche, Matthias Koller, Jan Kosmol, Kora Kristof, Martin Lambrecht, Martin Lange, Uwe Leprih, Lars Mönch, Nathan Obermaier, David Pfeiffer, Sebastian Plickert, Bettina Rechenberg, Martin Schmied, Jens Schuberth, Jan Seven, Sue Martina Starke, Max Werlein

**Redaktion:**

Fachgebiet I 2.2 Energiestrategien und -szenarien  
Kirsten op de Hipt, Katja Purr

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und  
-szenarien, Ressourcenschonung  
Jens Günther, Ulrich Lorenz

**Satz und Layout:**

Atelier Hauer + Dörfler GmbH, Berlin

**Publikationen als pdf:**

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

**Bildquellen:**

Shutterstock

Stand: Oktober 2017

ISSN 1862-4359

**Den Weg zu einem  
treibhausgasneutralen  
Deutschland ressourcen-  
schonend gestalten**

Nachfolgend dargestellte Szenarienergebnisse basieren im Wesentlichen auf Analysen des laufenden Forschungsvorhabens „Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland“ (FKZ: 3715 41 115 0), welches von dem Konsortium ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, IWES – Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, CONSIDEO GmbH sowie Dr. Karl Schoer SSG bearbeitet wird.

Die systemdynamischen Modellierungen wurden im Rahmen des Projektes KliReX – „Erkennen und Bewerten des Treibhausgasminderungspotentials der Ressourceneffizienzpolitik (FKZ 3716 32 100 0) von der CONSIDEO GmbH durchgeführt.



# Inhalt

|  |    |
|--|----|
| <b>1 Elemente eines zukunftsfähigen und nachhaltigen Deutschlands – treibhausgasneutral und ressourcenschonend</b> ..... | 7  |
| <b>2 Ein Weg zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland</b> .....                                    | 15 |
| 2.1 Grundannahmen des Szenarios.....   | 16 |
| 2.2 Endenergienachfrage .....  | 17 |
| 2.3 Energieversorgung.....   | 19 |
| 2.4 Gebäude .....  | 25 |
| 2.5 Verkehr .....  | 28 |
| 2.6 Industrie.....   | 33 |
| 2.7 Landwirtschaft & LULUCF.....   | 36 |
| 2.8 Abfall & Abwasser .....  | 40 |
| <b>3 Ein Weg zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Wirkungen</b> .....                        | 43 |
| 3.1 Wirkung auf Treibhausgasemissionen.....  | 44 |
| 3.2 Wirkung auf Ressourceninanspruchnahme .....  | 46 |
| <b>4 Fazit und Handlungsbedarf zur Umsetzung des Transformationsprozesses</b> .....                                      | 59 |
| <b>5 Literaturverzeichnis</b> .....  | 65 |









1

**Elemente eines zukunftsfähigen  
und nachhaltigen Deutschlands –  
treibhausgasneutral und  
ressourcenschonend**





Das durch die fossile industrielle Revolution möglich gewordene Wirtschaftswachstum – und die damit verbundene Ressourcennutzung<sup>1</sup> – bei einer stetig ansteigenden Weltbevölkerung haben inzwischen Grenzen dieser Art des Wirtschaftens aufgezeigt. Die Umwelt ist in zunehmender Weise bedroht, beginnend mit dem Problem der Veränderung des Klimas durch den Menschen, der Erosion der fruchtbaren Böden und der Wasserverschmutzung, den Verlusten an Biodiversität bis hin zu den verschiedensten schädlichen Auswirkungen anthropogener Schadstoffe auf Mensch und Umwelt. Einige Ressourcen neigen sich nach vielen Jahren der Verschwendung in den nächsten Jahrzehnten dem Ende zu oder führen zunehmend zu nicht akzeptablen Umweltauswirkungen. Außerdem sind die erwirtschafteten Reichtümer und die erreichte Bildung, Lebenserwartung und Lebenschancen weltweit zwischen den Industrieländern und den übrigen Ländern, als auch innerhalb der Länder extrem ungleich verteilt.

Bereits in den 1990er Jahren wurden in verschiedenen Studien mögliche Wege zu einer dauerhaften und umweltgerechten Entwicklung aufgezeigt (siehe hierzu u. a. „Nachhaltiges Deutschland – Wege zu einer dauerhaft und umweltgerechten Entwicklung“ (UBA 1998a) und „Zukunftsfähiges Deutschland in einer globalisierten Welt“ (BUND & Misereor (Hersg) 1996a). Die „Grundanforderung“ einer nachhaltigen Entwicklung ist, dass die Funktionen der Umwelt, d. h. die natürlichen Lebensgrundlagen in ihren verschiedenen Rollen für diese und die nächsten Generationen nicht weiter gefährdet sind.

Die Nutzung der natürlichen Ressourcen steigt seit Jahren kontinuierlich, allein der weltweite Verbrauch an Primärrohstoffen hat sich in den letzten 40 Jahren auf fast 85 Mrd. t in 2015 verdreifacht (Ekins, et al. 2017b). Im Jahr 2050 wird die auf bis zu 10 Mrd. Menschen wachsende Weltbevölkerung schätzungsweise mehr als 140 Mrd. t Mineralien, Erze, fossile Brennstoffe und Biomasse in Anspruch nehmen, wenn die heute bevorzugten Konsummuster beibehalten werden (Fischer-Kowalski, et al. 2011a).

Trotz einer wachsenden Anzahl von Maßnahmen zur Minderung des Klimawandels sind die gesamten anthropogenen Treibhausgasemissionen von 1970

bis 2010 weiter gestiegen. Zwischen 2000 und 2010 sogar mit höheren absoluten Anstiegen. Im Jahr 2010 haben die anthropogenen Treibhausgasemissionen einen Wert von  $49 \pm 4,5$  Gt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (im Folgenden: CO<sub>2</sub>Äq) pro Jahr erreicht, also rund 30% mehr als noch im Jahr 1990<sup>2</sup> (IPCC 2014h). Durch die intensivere Nutzung fossiler Energieträger wurde ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 58% gegenüber 1990 verursacht (International Energy Agency 2016k).<sup>3</sup> Dies ist verbunden mit dem Anstieg der weltweiten Jahresmitteltemperatur, welche im Jahr 2016 die höchste jemals gemessene mittlere Temperatur darstellte. Die Temperaturen waren im Mittel 0,83°C höher als im Vergleichszeitraum zwischen 1961–1990 und gleichzeitig 1,1°C höher als im vorindustriellen Zeitalter (World Meteorological Organization (WMO) 2017n).

Der steigende Ressourcenbedarf belastet die Ökosysteme zunehmend und gefährdet damit auch das Wohlergehen der Weltbevölkerung. Förderung, Aufbereitung und Verarbeitung von Rohstoffen und die Weiterverarbeitung zu Produkten benötigen stellenweise große fossile Energiemengen und belasten damit das Klima. Zudem ist häufig mit der Förderung und Aufbereitung von abiotischen Rohstoffen in den Abbauländern eine Kontamination der Trinkwasserressourcen, der Gewässer, des Bodens und der Atemluft mit der Folge von Gesundheitsschäden verbunden. Durch den hohen Wasser- und Flächenbedarf kommt es vielfach zu Nutzungskonflikten, die nicht selten die Lebensgrundlage der lokalen Bevölkerung gefährden. Vor dem Hintergrund der begrenzten Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen und der mit ihrer Nutzung verbundenen Umweltwirkungen wird deutlich, dass die Art der Ressourceninanspruchnahme in Industriestaaten nicht weltweit übertragbar ist. Somit stellt sich auch immer drängender die Frage nach einer gerechten Verteilung der Ressourcen und der Zugänge zu ihnen, sowohl innerhalb der heutigen Generationen (intragenerationelle Gerechtigkeit), als auch zwischen den heutigen und künftigen Generationen (intergenerationelle Gerechtigkeit).

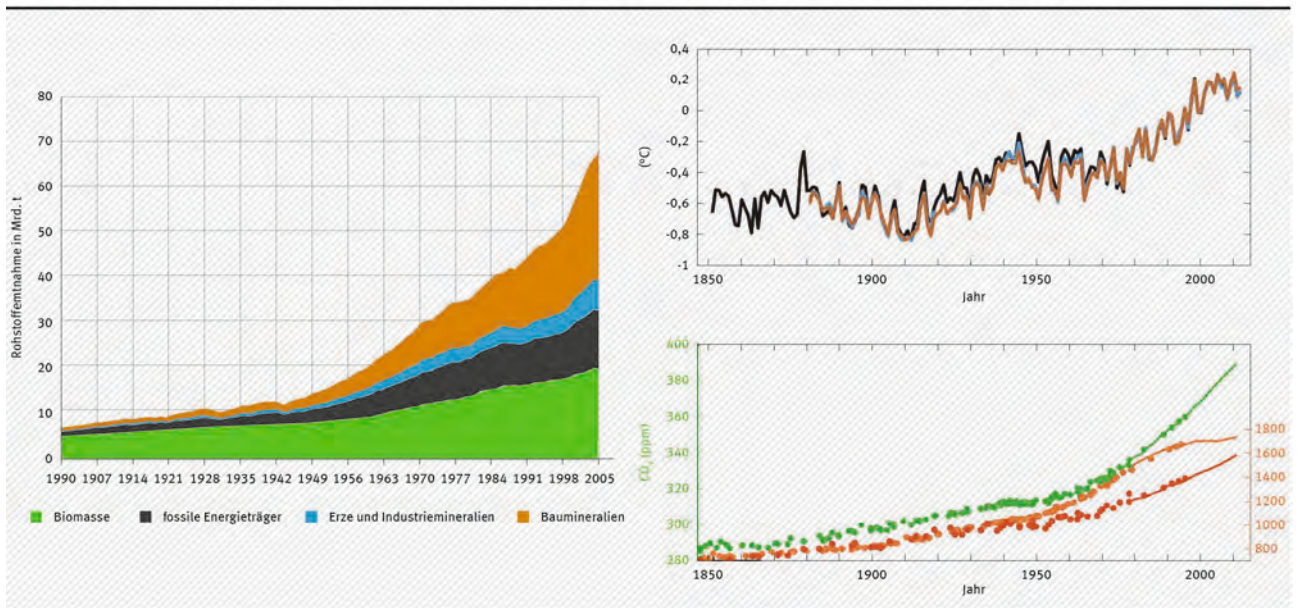
Schnelles Handeln ist erforderlich um zu vermeiden, dass wir an einen Punkt kommen, an dem wir uns unserer eigenen natürlichen Grundlagen berauben. Nachhaltige Entwicklung setzt einen tiefgreifenden Wandel von Gesellschaft und Wirtschaft voraus.

1 Abiotische und biotische Primärrohstoffe (inkl. Energieträger), Fläche, Wasser, Boden, Luft, strömende Ressourcen wie Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie und Ökosystemleistungen.

2 1990: rund 38 Gt CO<sub>2</sub>Äq pro Jahr.  
3 Bis 2014.

Abb. 1.1

**Globale Rohstoffentnahme 1900–2009 (links), globale mittlere kombinierte Land- und Ozeanoberflächen-temperatur-Anomalie (rechts oben), global gemittelte Treibhausgaskonzentration (rechts unten)**



Quelle: Krausmann, et al. 2009a (links); IPCC 2014h (rechts)

Doch welche Wege sind jene, die zu einem nachhaltigen und zukunftsfähigem Deutschland in Europa führen? Die Entwicklung komplexer und dynamischer Systeme, wie die Anthroposphäre, ist grundsätzlich schwierig zu beschreiben. Daher ist man zu so genannten Szenarienstudien übergegangen. Diese ermöglichen es verschiedene mögliche „Zukünfte“ zu analysieren und damit einen Lösungsraum für eine nachhaltige Entwicklung aufzuspannen. Dieser Bericht des Umweltbundesamtes (UBA) beschreibt erste Ergebnisse einer solchen Szenarienstudie, die Treibhausgasneutralität und Ressourcenschutz gemeinsam und integriert betrachtet.

Es ist unbestritten, dass der Klimawandel und seine Folgen neben der Ressourcenschonung eine der größten globalen Herausforderungen unserer Zeit ist und auch auf lange Sicht bleiben wird. Es bedarf daher ambitionierte und umfangreiche Klimaschutzmaßnahmen, um die globale Erwärmung zu begrenzen. Den Industriestaaten kommt dabei eine besondere Verantwortung zu, da ihr heutiger Wohlstand zu einem nicht unerheblichen Maß auf der weltweiten Ausbeutung natürlicher Ressourcen, z. B. der Nutzung fossiler Energieträger und einer zunehmenden globalen Inanspruchnahme von Landflächen basiert. Neben der notwendigen Umsetzung von Treibhausgasminderungen ist die Senkung der

Rohstoffinanspruchnahme ein weiteres gleichrangiges Ziel der Politik, um unsere natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten und innerhalb der planetaren Grenzen zu agieren.

### Nationale und internationale Verpflichtungen Deutschlands

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich bereits 2010 auch aufgrund dieser historischen Verantwortung und seiner wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit auf eine Minderung der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bis 2050 um 80 bis 95 % gegenüber 1990 festgelegt. Im Abkommen von Paris haben sich die Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention im Jahr 2015 auf ein gemeinsames Vorgehen im Kampf gegen den Klimawandel mit dem Ziel, die Erderwärmung deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten sowie Anstrengungen zu unternehmen, um den Temperaturanstieg auf 1,5°C zu begrenzen, verständigt. Vor diesem Hintergrund ist es aus Sicht des Umweltbundesamtes notwendig, dass der Beitrag Deutschlands – als eine reiche Industrienation und eine der führenden Nationen im Klimaschutz – am oberen Ende des 2010 von der Bundesregierung beschlossenen Zielkorridors für 2050 von 95 % Treibhausgasemissionsminderung gegenüber 1990 festgelegt wird.

Deutschland hat mit dem deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) (BMUB 2012b) bereits seit 2012 eine Strategie implementiert und 2016 mit ProgRess II fortgeschrieben, um die Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfung zu steigern und eine absolute Reduktion der Rohstoffinanspruchnahme zu erreichen. ProgRess soll laut Beschluss der Bundesregierung auch in Zukunft stetig fortentwickelt werden.

Auch hinsichtlich der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen, insbesondere der Rohstoffnutzung und Flächeninanspruchnahme hat Deutschland frühzeitig konkrete Ziele formuliert. In ihrer Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 (Bundesregierung 2002a) formulierte die Bundesregierung unter anderem das Ziel die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands von der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen und der damit verbundenen Umweltwirkungen zu entkoppeln. Konkret legte die Bundesregierung eine Verdopplung der abiotischen Rohstoffproduktivität<sup>4</sup> bis 2020 im Vergleich zu 1994 sowie eine Reduktion der Flächenneuinanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr bis 2020 auf 30 ha/Tag fest. In der Neufassung der Nachhaltigkeitsstrategie von 2016 (Bundesregierung 2017o) werden diese Ziele auch im Lichte der „Sustainable Development Goals“ (SDG) der Vereinten Nationen fortgeschrieben und ergänzt. So soll die Flächenneuinanspruchnahme bis 2030 auf unter 30 ha/Tag begrenzt werden. Hinsichtlich der Rohstoffnutzung soll der Trend der Gesamtrohstoffproduktivität<sup>5</sup> der Jahre 2000–2010 bis 2030 fortgeführt werden, dies entspricht einer jährlichen Steigerung um 1,3 Prozent. Dieses Ziel wird auch in der aktuellen Fassung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) (BMUB 2016l) als Hauptziel verfolgt und durch sektorale Ziele ergänzt.

Auch in Europa wird zunehmend eine Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Implementierung entsprechender Politiken angestrebt (EEA 2016g). International gewinnen die nachhaltige Nutzung

natürlicher Ressourcen und die Steigerung der Ressourceneffizienz an Bedeutung. Dies haben die Ziele der Agenda 2030 der Vereinten Nationen und nicht zuletzt die Beschlüsse der G7 von Elmau und Toyama (BMUB 2016h) und der G20 von Hamburg (G20 Germany 2017 2017m) gezeigt.

Klare politisch anerkannte internationale Ziele, wie beim Klimaschutz, existieren für eine nachhaltige Rohstoff- und Ressourcennutzung heute nicht. In den 1990er Jahren wurde von verschiedenen Seiten eine Steigerung der Ressourceneffizienz um einen Faktor 10 – d. h. Senkung der Ressourcennutzung per Capita um 90 % – vorgeschlagen (Lehmann und Schmidt-Bleek 1993a, Schmidt-Bleek 1993b). In jüngster Zeit wird ein Korridor von 3 bis 8 Tonnen vorgeschlagen (Bringezu 2015b, IRP 2014f, Fischer-Kowalski, et al. 2011a).

Um diese Ziele zu erreichen und gleichzeitig auch die notwendige Anpassung an die nicht vermeidbaren Auswirkungen des Klimawandels zu ermöglichen, ist eine grundlegende Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung notwendig. Eine solche Transformation zur Treibhausgasneutralität und Ressourcenschonung betrifft alle Teilbereiche unserer Gesellschaft gleichzeitig: neben der Energieversorgung tragen vor allem auch Mobilität, Landwirtschaft und Ernährungssystem, Industrie, Gewerbe sowie die Bereiche Bauen und Wohnen zu den Emissionen von Treibhausgasen und Ressourcenverbräuchen bei. Die Schonung natürlicher Ressourcen und Klimaschutz gehören zwingend zusammen, um systematisch Synergien beider Politikfelder zu erschließen und gleichzeitig kontraproduktive Wechselwirkungen abzumildern.

### Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050

Die UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014a) hat – mit einer reinen Ausrichtung auf den Klimaschutz – seinerzeit gezeigt, dass ambitionierte Klimaschutzziele am Industriestandort Deutschland technisch erreichbar und umsetzbar sind. Dabei wurden sämtliche Treibhausgasemissionsquellen entsprechend der internationalen Berichterstattung berücksichtigt, darüber hinaus auch die national verursachten Treibhausgasemissionen beim internationalen Flug- und Seeverkehr sowie die Emissionen aus dem Bereich der Landnutzung,

4 Der Indikator „Rohstoffproduktivität“ ist das Verhältnis des Bruttoinlandsprodukt (BIP) zum abiotischen Direkten Materialeinsatz (Direct Material Input = DMI). Der DMI ist die Summe aus der Masse der Rohstoffentnahme im Inland und der Masse der importierten Güter. Der Indikator erfasst nicht die indirekte Rohstoffinanspruchnahme durch importierte Fertigwaren, bildet auch die Verlagerung ressourcenintensiver Produktionsprozesse etc. ins Ausland und die ungenutzten Entnahmen nicht ab.

5 Im Vergleich zur Rohstoffproduktivität berücksichtigt die Gesamtrohstoffproduktivität auch die indirekten Rohstoffinanspruchnahmen durch importierte Halb- und Fertigwaren ab. Zur Angleichung der Systemgrenzen wird entsprechend das Bruttoinlandsprodukt um den monetären Wert der Importe ergänzt.



Land- und Forstwirtschaft (LULUCF)<sup>6</sup>. Das UBA hat mit seiner Studie ein Zielszenario aufgezeigt, wie in den einzelnen Sektoren und Anwendungsbereichen eine Gesamttreibhausgasreduzierung von knapp 95 % im Vergleich zum Jahr 1990 beziehungsweise eine jährliche Pro-Kopf-Emission von 1 Tonne CO<sub>2</sub>-Äq erreicht werden kann. Dabei geht die Analyse von bereits heute verfügbaren Techniken aus und setzt spezifische, teilweise ambitionierte Weiterentwicklungen und Innovationen innerhalb dieser Techniken voraus. Es wurden auch in begrenztem Umfang Änderungen von Lebensstilen oder veränderte Konsummuster im Ernährungsbereich und Mobilitätsverhalten angenommen. Dennoch lag der Schwerpunkt der UBA-Studie bewusst auf dem Einsatz technischer Lösungen, ließ aber Kostenschätzungen, politische Durchsetzungsmöglichkeiten oder Fragen der gesellschaftlichen Akzeptanz zunächst außen vor.

Es zeigt sich, dass die Energieversorgung aller Anwendungsbereiche 2050 vollständig treibhausgasneutral gestaltet sein muss, da in Bereichen wie der Landwirtschaft und in einigen Industrieprozessen eine vollständige Reduzierung der Treibhausgasemissionen, nach heutigem Kenntnisstand, nicht möglich ist. Dies erfordert sowohl eine vollständig auf erneuerbaren Energien beruhende Energieversorgung als auch die weitest gehende Erschließung vorhandener Effizienzpotenziale. Weiterhin ist auch der Einsatz fossiler Energieträger außerhalb der Energieerzeugung in allen Anwendungsbereichen vollständig durch regenerative und strombasierte Energieträger zu ersetzen. Die UBA-Studie (UBA 2014a) zeigt, dass die zu erwartenden Energiebedarfe in 2050 vollständig durch erneuerbare Energiequellen gedeckt werden können. Dabei besteht über alle Anwendungsbereiche hinweg eine große Nachfrage an direkter Nutzung erneuerbaren Stroms. Die Brenn-, Kraft- und Rohstoffnachfrage<sup>7</sup> der Anwendungsbereiche wird durch Wasserstoffproduktion bei der Elektrolyse von Wasser und anschließender katalytischer Synthese von Wasserstoff und Kohlendioxid zur Bereitstellung von Kohlenwasserstoffverbindungen (z. B. Methan oder Flüssigkraftstoffen) ermöglicht.

Bei der Bereitstellung und Nutzung von Energie wird der größte Anteil der Treibhausgasemissionen verursacht, so dass für die Erfüllung langfristiger



Klimaschutzziele eine Umstrukturierung des Gesamtenergiesystems über alle Anwendungsbereiche hinweg (Strom, Wärme, Verkehr, Industrie) notwendig ist. Einhergehend sind ein hoher Bedarf an regenerativen Stromerzeugungsanlagen (Nettostromerzeugung) und erhebliche Veränderungen in den Anwendungstechniken erforderlich. Je nach angestrebter Technik ist der Um- oder gar Rückbau von Infrastrukturen notwendig. Der Bau von Energieerzeugungsanlagen führt zeitweise zu deutlich erhöhter Inanspruchnahme bestimmter Rohstoffe, zum Beispiel Metallen und Baumineralien. Dem gegenüber stehen sinkende Ressourceninanspruchnahmen durch den Rückgang der Nutzung fossiler Energien und deren Infrastrukturen. Außerdem stehen mehr und mehr Rohstoffe im anthropogenen Lager für das Recycling zur Verfügung, wodurch langfristig die Primärrohstoffentnahme reduziert werden kann.

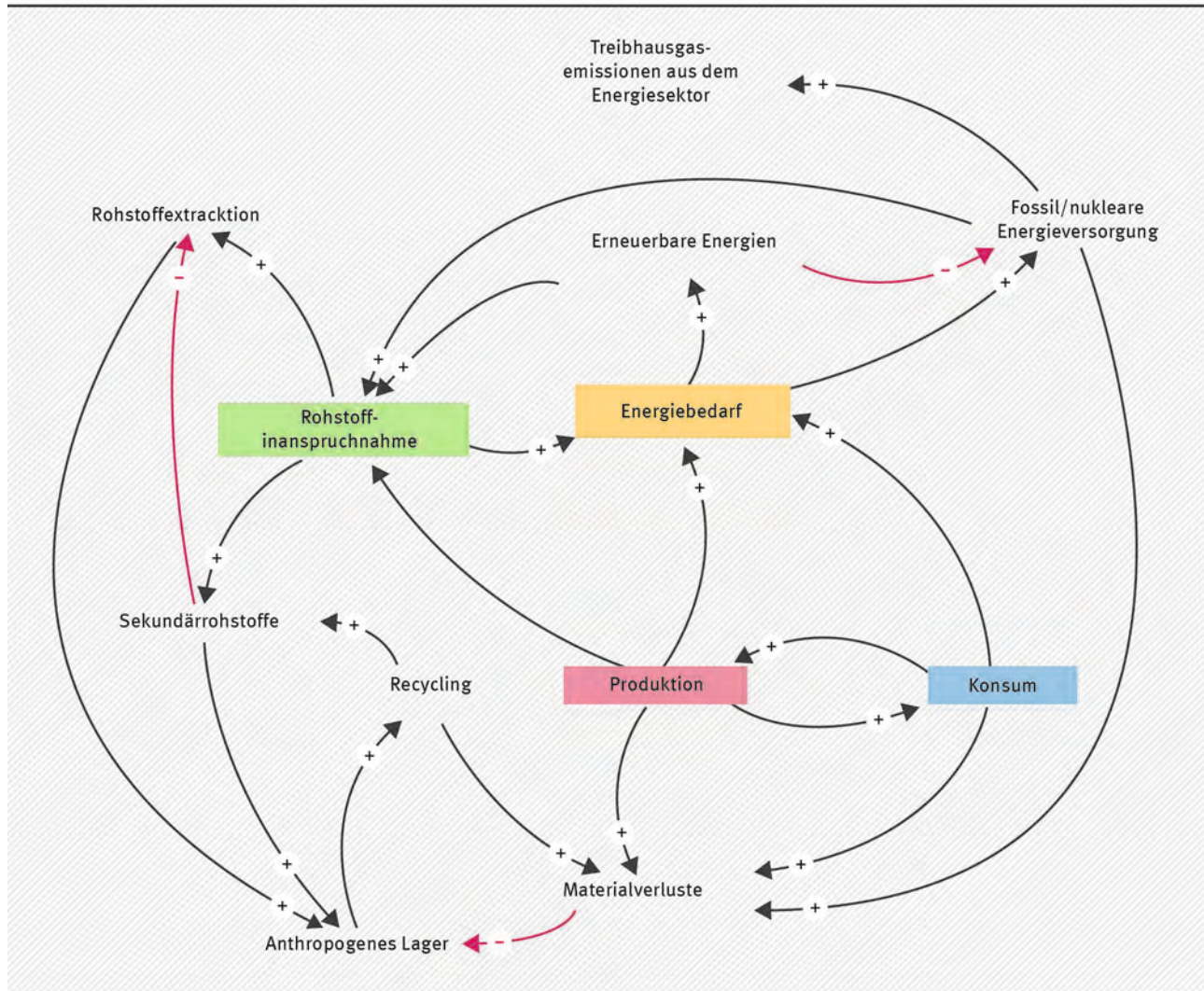
Wenn auch das Aufzeigen der technischen Machbarkeit ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Treibhausgasneutralität ist, erfordert die Transformation zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft eine deutlich erweiterte Perspektive. Insbesondere ist es notwendig, die für diese Transformation notwendigen

6 Land use, land use changes and forestry.

7 Nicht-energetischer Bedarf an Endenergieträgern.

Abb. 1.2

**Systemischer Zusammenhang von Rohstoffinanspruchnahme und Klimaschutz**



Quelle: eigene Darstellung

Rohstoffe und Ressourcen zu betrachten, sowohl in ihrer zeitlichen Entwicklung, als auch in der Wechselwirkung der verschiedenen Sektoren und der Wechselwirkung des Energiesystems mit dem Ressourcensystem. Die Schonung natürlicher Ressourcen und Klimaschutz gehören zwingend zusammen, um systematisch Synergien beider Politikfelder zu erschließen. Diese beiden Politikfelder lassen sich nicht allein national betrachten. Die Wirkungen des Klimawandels sind global zu spüren. Und auch die globalen Handelsverflechtungen und die ungleichmäßige Verteilung von Ressourcen machen eine globale Perspektive, die Berücksichtigung von Wechselwirkungen und damit systemische Einbettung unverzichtbar. Bei den konkreten Vorschlägen zur schrittweisen Umsetzung eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland über konkrete Instrumente sind dann auch Verteilungs- und Sozialfragen – nationale wie international – wichtige Bausteine.

**Systemischer Ansatz – Wege in ein treibhausgasneutrales und ressourceneffizientes Deutschland im Jahr 2050**

Die wechselseitigen Abhängigkeiten und Rückkopplungen zwischen Ressourcenschonung und Klimaschutz erfordern einen systemischen Ansatz. Die Abbildung 1.2 zeigt in stark vereinfachter Form, wie die Nutzungen von Energie und Rohstoffen gekoppelt sind. Die Produktion von Gütern und der entsprechende Konsum sind die treibenden Kräfte hinter Energie- und Rohstoffnutzung. Wenn die Nutzung von Energie in nicht-nachhaltiger Form (fossil, nuklear) geschieht, sind Extraktion und Verbrauch von Rohstoffen die Folge, mit den bereits genannten negativen Umwelteffekten. Zudem sind die verbrauchten Rohstoffe für die weitere Nutzung verloren. Anders die Nutzung von Rohstoffen für den Bau von erneuerbaren Energieanlagen. Diese Rohstoffe verbleiben im anthropogenen Lager und können im



Sinne der Kreislaufwirtschaft zu einem Teil einer weiteren Nutzung zugeführt werden. Dies bietet langfristig auch Chancen mit Blick auf die Wertschöpfung, wenn Recycling- und Produktionsanlagen innerhalb einer Volkswirtschaft angesiedelt sind und Rohstoffe nicht importiert werden müssen.

In einem interdisziplinären Prozess des UBA sowie mit externer Unterstützung auf Basis von Forschungsvorhaben, soll an Hand von mehreren Szenarien der Lösungsraum für diesen Transformationsprozess aufgezeigt werden. Zentrale Fragen in diesem Prozess sind dabei:

- ▶ Was sind plausible und nachhaltige Wege hin zu einem treibhausgasneutralen, post-fossilen und dabei möglichst ressourcenschonenden Deutschland 2050 auf Basis heute schon existierender Technologien?
- ▶ Welche Instrumente und Maßnahmen brauchen wir, um dies umzusetzen?
- ▶ Wie entwickelt sich der Rohstoffbedarf in einem treibhausgasneutralen Deutschland bis 2050?
- ▶ Wie beeinflussen sich Klima- und Ressourcenschutz gegenseitig?
- ▶ Existieren ressourcen- und rohstoffsparende Ansätze und Möglichkeiten eine treibhausgasneutrale Wirtschaft zu erreichen?

- ▶ Welche Beiträge können und müssen Wirtschaft und Gesellschaft leisten?
- ▶ Welche Probleme (z. B. Rohstoffknappheiten) sind heute schon absehbar?

Mit der vorliegenden Studie wird ausschließlich das erste dieser Szenarien präsentiert. Orientierend am Zielszenario „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ liegt der Schwerpunkt dieses Szenarios „Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency“ (GreenEe) darauf, einen ambitionierten und energetisch effizienten Transformationspfad hin zur Treibhausgasneutralität ressourcenschonend darzustellen. Mit den laufenden Arbeiten zu weiteren Szenarien wird der Lösungsraum weiter konkretisiert. Dabei werden die Einflüsse und Wechselwirkung des Anstrengungsniveaus im Laufe des Transformationsprozesses hin zur Treibhausgasneutralität (Green, GreenSupreme), der Anlagentechnikwahl hinsichtlich Materialeffizienz (GreenMe) sowie der Lebensstile betrachtet (GreenLife) (siehe Tabelle 1.1).

Tab. 1.1

**Überblick der geplanten Szenarien, grün markiert das Szenario dieser Studie**

|  | GreenEe   | Green     | GreenMe   | GreenLife    | Green-Supreme |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------|
| <b>Treibhausgasminderung 2050</b>  | Sehr hoch | Sehr hoch | Sehr hoch | Sehr hoch    | Sehr hoch     |
| <b>Ambitionsniveau der Klimaschutzanstrengungen im Transformationspfad (2030 und 2040)</b> | hoch      | mittel    | hoch      | hoch         | Sehr hoch     |
| <b>Endenergiebedarf</b>  | niedrig   | hoch      | niedrig   | sehr niedrig | niedrig       |
| <b>Rohstoffinanspruchnahme</b>   | mittel    | hoch      | niedrig   | niedrig      | niedrig       |
| <b>Rohstoffeffizienz</b>   | hoch      | mittel    | Sehr hoch | hoch         | Sehr hoch     |
| <b>Änderungen der Verhaltensweise*</b>   | mittel    | mittel    | mittel    | Sehr hoch    | hoch          |

\* Beispielsweise im Bereich Ernährung, Mobilität, Konsum u.ä..

Quelle: eigene Darstellung



# 2

Ein Weg zum  
treibhausgasneutralen und  
ressourcenschonenden  
Deutschland





## 2.1 Grundannahmen des Szenarios

Deutschland ist – eingebettet in die Europäische Union (EU) und die Welt – ein Land mit hoher Bevölkerungsdichte und starker Wirtschaftskraft. Es ist davon auszugehen, dass sich die heutigen Strukturen nicht fundamental auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft verändern werden. Deutschland wird – so die Grundannahme des vorgestellten Szenarios – auch 2050 ein produzierender Industriestandort sein. Das Wirtschaftswachstum ist mit durchschnittlich 0,7 % moderat und der Außenhandel im Vergleich zu heute kaum verändert. Gleichwohl bedarf es eines Wandels und Umdenkens, um eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Gesellschaft zu realisieren. Dies betrifft alle Bereiche des täglichen Lebens, aber auch des Wirtschaftens in Deutschland.

Unabhängig von jüngsten Entwicklungen ist die zukünftige Entwicklung der Bevölkerungszahlen recht stabil. So wird in dem vorgestellten „GreenEe“-Szenario<sup>1</sup> davon ausgegangen, dass sich weder die Geburtenraten noch die Lebenserwartungen wesentlich ändern, so dass die Bevölkerungszahl bei moderater Zuwanderung im Jahr 2050 bei knapp 72 Mio. Menschen liegen wird (Statistisches Bundesamt 2015a). Entsprechend der Bevölkerungsentwicklung steigt bis 2030 der Wohnflächenbedarf noch an und geht danach wieder auf den Flächenbedarf von 2010 zurück. Im Jahr 2050 erfolgt netto keine Flächenneuinanspruchnahme. Bis 2030 sinkt die Flächenneuinanspruchnahme auf 20 ha/Tag und in den darauffolgenden Dekaden bis 2050 in Richtung Netto-Null. Der Zubau kommunaler Infrastrukturen wie die Wasserver- und -entsorgung oder Telekommunikationsinfrastruktur ist im GreenEe-Szenario an die Bevölkerungsentwicklung und die Entwicklung der Flächenneuversiegelung gekoppelt.

Im Alltag der Bevölkerung im Jahr 2050 und über alle Wirtschaftsbereiche ist eine zukunftsfähige und ausgeprägte Informations- und Kommunikationstechnologie fester Bestandteil. Auch eine gesunde und nachhaltig produzierte Ernährung ist Teil der stetigen Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft. Sowohl im Personen- wie auch im Güterverkehr wird eine Verkehrswende mit Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz Realität. Im Güterverkehr werden durch intelligente Logistik, im

Personenverkehr durch eine Stadt der kurzen Wege Verkehr vermieden. Der Energiebedarf des Verkehrs sinkt, in dem Motoren und Fahrzeuge weiter technisch optimiert werden. Gütertransporte werden von der Straße auf energieeffizientere Transportmittel wie Schiene oder Schiff verlagert, attraktive Angebote für Bahn oder ÖPNV gestalten den Personenverkehr klimafreundlicher. Die Verkehrsinfrastruktur ändert sich dabei nur moderat. In dem Szenario wird davon ausgegangen, dass weder neue Wasserstraßen, noch neue Flughäfen gebaut werden. Die Infrastrukturen werden mit einer ausgeprägten Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge und den Netzausbau für Oberleitungshybrid-LKW einer nachhaltigen Energieversorgung des Verkehrs gerecht.

Ebenso finden Änderungen und Ertüchtigungen der Energieinfrastrukturen insbesondere der Stromnetze statt, um eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Versorgung vollständig basierend auf erneuerbaren Energien sicher zu stellen. Ein hohes Maß an Versorgungssicherheit wird bei der dargebotsabhängigen Erzeugung der erneuerbaren Energien Wind und Photovoltaik durch Integration flexibler Erzeugungsanlagen, Stromverbraucher und Speicher gewährleistet. Das heißt konkret, dass durch die digitale Vernetzung entsprechende Preissignale über alle Anwendungsbereiche hinweg, also Industrie und Haushalte, Anreize zum Lastmanagement und damit zur zeitlichen Verlagerung von Strombedarfen erfolgen. Rohstoffverfügbarkeiten und Akzeptanz der Bevölkerung durch Rücksichtnahme auf Landschafts- und Artenschutz sichern einen effizienten Umgang mit Energie. Energieeffizienz in Gebäuden, Industrie und Verkehr sowie die zunehmende Sektorkopplung<sup>2</sup> und direkte Stromnutzung gehen Hand in Hand mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien.

Gleichzeitig vollzieht sich in Deutschland eine Ressourcenwende bei der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen und insbesondere der Nutzung von abiotischen und biotischen Rohstoffen. Im Mittelpunkt stehen dabei nicht mehr die Produkte, sondern die Dienstleistungen und Bedürfnisse wie Mobilität, Wohnen, Ernährung, Kommunikation etc. die

1 Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Energy efficiency.

2 Unter Sektorkopplung wird die stärkere Verzahnung des Strom-, Wärme-, Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffmarktes verstanden. Sektorkopplung ermöglicht durch direkte oder indirekte Verwendung von regenerativem Strom eine treibhausgasneutrale Versorgung aller Anwendungsbereiche bzw. die vollständige Substitution fossiler Energieträger und Rohstoffe. Sektorkopplung erhöht die Flexibilität im Stromsystem und unterstützt so die Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung.

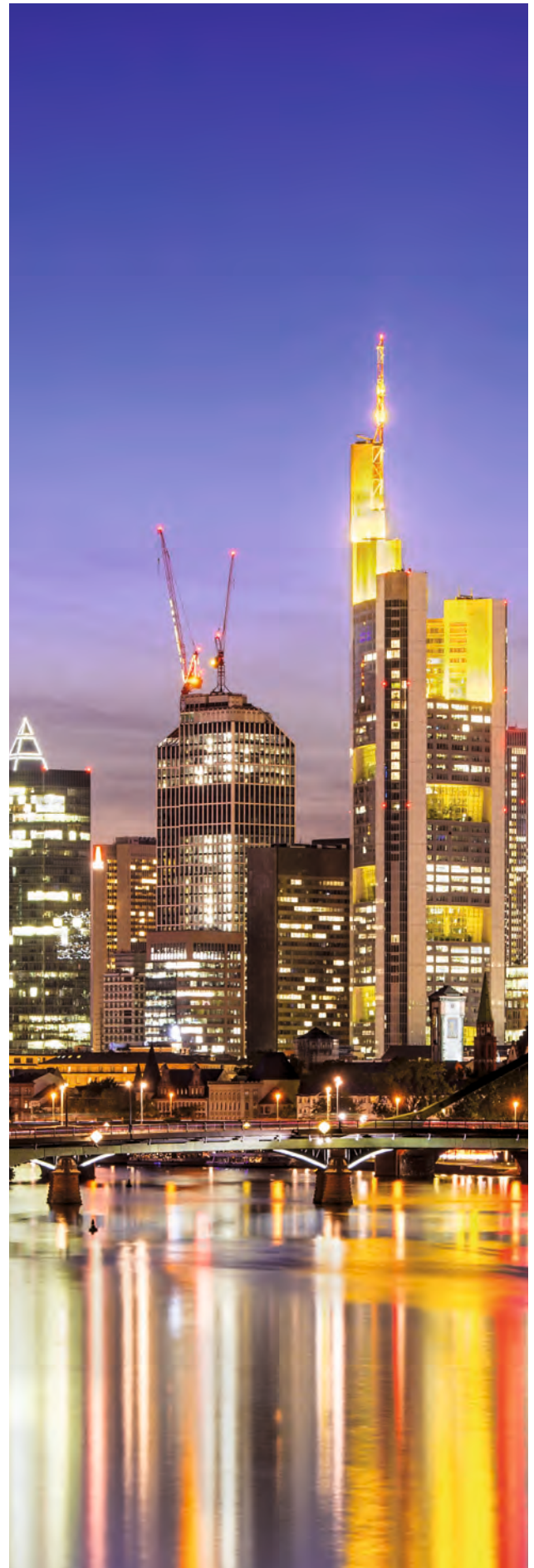
möglichst ressourcenschonend erbracht werden. Die dafür erforderlichen Rohstoffe werden dabei weitestgehend im Kreislauf geführt, wobei nicht erneuerbare Rohstoffe zunehmend durch nachwachsende bzw. erneuerbare Rohstoffe ersetzt werden. Anstelle natürlicher Lagerstätten werden zunehmend anthropogene Lagerstätten (Materialbestände in langlebigen Gütern, Infrastrukturen, Gebäuden und Deponien) genutzt, kritische Rohstoffe wie Gallium, Indium und Antimon werden zunehmend durch weniger kritische Rohstoffe substituiert. Das Ökodesign hat sich als grundlegendes Prinzip in der Produktgestaltung etabliert. Bereits in der Entwurfsphase werden dabei Aspekte wie Lebensdauer, Reparierbarkeit, Demontierbarkeit, Abfallvermeidung, Wiederverwendbarkeit und Rezyklierbarkeit mitbedacht und im Sinne einer ökologischen Gesamtoptimierung des Produktes adressiert.

Ein möglicher Weg in eine solche Gesellschaft wird im folgendem, ausführlicher vorgestellten Szenario im Wesentlichen technisch beschrieben. Dabei werden insbesondere auch die Wechselwirkungen der verschiedenen Wirtschafts- und Lebensbereiche untereinander berücksichtigt. Veränderte Konsummuster werden lediglich im Mobilitätsverhalten und der Ernährung unterstellt.

## 2.2 Endenergienachfrage

Die sektorübergreifende sichere Energieversorgung ist ein zentrales Fundament für unser heutiges Wohlstandsniveau und unsere Wirtschaftsleistung. Zu einem großen Teil basiert dies auf der Nutzung fossiler Energieträger und hoher Ressourceninanspruchnahme, welche Hauptverursacher der heutigen Umweltprobleme sind. Die Transformation der Energieversorgung hin zu einer umweltschonenden, treibhausgasneutralen Gesellschaft und Wirtschaft basiert auf drei zentralen Prinzipien:

- ▶ Effizienz: Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale über alle Bereiche hinweg erschließen;
- ▶ Erneuerbare Energien: Ausbau der erneuerbaren Energien sowie deren Nutzung in allen Nachfragebereichen, und insbesondere bei der Stromerzeugung;
- ▶ Sektorkopplung: direkte oder indirekte Verwendung von regenerativem Strom über alle Anwendungsbereiche hinweg zur vollständigen Substitution fossiler Energieträger und Rohstoffe.



Bereits in der UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014a) wurde dargestellt, dass nachhaltige – also im Wesentlichen ohne CCS, energetische Nutzung von Anbaubiomasse und grundsätzlich ohne Atomenergie – ambitionierte Klimaschutzziele nur mit einer vollständigen Versorgung mit erneuerbaren Energien realisierbar sind, da in Bereichen wie Landwirtschaft und Industrie unvermeidbare Treibhausgasemissionen entstehen.

Energieeffizienzpotenziale unter Berücksichtigung von Rohstoffeffizienz sind ein entscheidender Faktor für den Bedarf an erneuerbaren Energien und damit auch für den dort benötigten Rohstoffbedarf. Gleichfalls ist zu berücksichtigen, dass fossile Energieträger nicht unmittelbar und in identischer Form durch erneuerbare Energien zu ersetzen sind. Vielmehr sind wie im heutigen Energiesystem die systemische Effizienz und die damit verbundenen Kosten zu berücksichtigen.

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), spielt in diesem Zusammenhang eine bedeutende Rolle. Das bedeutet nicht, dass die heutigen Energieträger eins zu eins substituiert werden sollen, beispielsweise fossiles Gas durch erneuerbares Gas. Vielmehr sollten Power to X-Techniken (PtX) entsprechend ihrem Substitutionspotenzial im Transformationsprozess integriert werden (UBA 2016a). Das bedeutet konkret, dass Elektromobilität im Verkehr und Power to Heat insbesondere in Verbindung mit Wärmepumpen in privaten Haushalten und GHD<sup>3</sup> frühzeitig zum Einsatz kommen sollen, da sie bereits heute einen positiven Klimaschutzeffekt bewirken. Auch in der Industrie ist die Integration von PtX-Techniken und insbesondere Power to Heat, welche oft mit der Umstellung von Prozesstechniken verbunden sind, von großer Bedeutung für den Klimaschutz. Um den absoluten Bedarf an erneuerbaren Energien und damit auch den Bedarf an Rohstoffen zu begrenzen, sind die Umstellungen auf effiziente PtX-Techniken bei ambitionierter Klimaschutzpolitik unausweichlich. Vor diesem Hintergrund ist die Transformation der Energieversorgung unmittelbar mit der Transformation in den Anwendungsbereichen verbunden.

Im GreenEe-Szenario wird davon ausgegangen, dass im Zeitraum bis 2030 sektorübergreifend Effizienzmaßnahmen ergriffen werden. Gleichzeitig erfolgt bereits die Integration effizienter Power to X-Techniken wie PtH (mit Wärmepumpen zur Raumwärmeversorgung) und Elektromobilität. Insbesondere bei der Raumwärmeversorgung kann der Endenergiebedarf durch Heben von Effizienzpotenzialen um etwa 25 % bis 2030 gegenüber 2015 reduziert werden. In der Dekade zwischen 2030 und 2040 erfolgt im Wesentlichen die Marktdurchdringung von PtX-Techniken in allen Anwendungsbereichen und damit verbunden im Verkehr, die bedeutender werdende Rolle von Oberleitungs-Hybrid-LKW und in der Industrie die Umstellung von Prozesstechniken, welche bis 2050 abgeschlossen sein wird. Abweichend zu der UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014a) wird bis 2050 von einer stärkeren Durchdringung der Fahrzeugflotten mit Elektromobilität, auch im Güterverkehr, und von PtH-Techniken in der Industrie und bei schlecht sanierbaren Gebäuden ausgegangen. Auch wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff, der zukünftig in der Stahlindustrie sowie in einigen Anlagen der chemischen Industrie benötigt wird, überwiegend vor Ort (nahe dem Produktionsstandort) durch Wasserelektrolyse erzeugt wird. Im Jahr 2050 wird für den Endenergiebedarf an Wasserstoff (97 TWh) in Deutschland eine Stromerzeugung von knapp 130 TWh benötigt (siehe Kapitel 2.3).

In vorliegender Studie wird auch der nicht-energetische Endenergiebedarf an Kohlenwasserstoffen als Rohstoff für die chemische Industrie im Szenario mit berücksichtigt, wobei unterstellt wird, dass dieser mittels Power to Gas/Liquid-Verfahren bereitgestellt wird. Gleichfalls werden die Energiebedarfe für die national verursachten internationalen Verkehre (See- und Flugverkehr) im Szenario mitbilanziert.

Die Entwicklung der sich ergebenden Endenergiebedarfe über alle Anwendungsbereiche hinweg ist in Tabelle 2.1 dargestellt. In den nachfolgenden Kapiteln 2.3 bis 2.6 wird dieser Transformationspfad genauer beschrieben.

Tab. 2.1

**Überblick der Endenergiebedarfe des GreenEe-Szenarios in TWh<sup>a)</sup>**

|                    |                   | Strom | Gase | Kohle | Sonstige fossile | Sonstige erneuerbare <sup>b)</sup> | Kraftstoffe <sup>c)</sup> | Rohstoffe         | Summe |
|--------------------|-------------------|-------|------|-------|------------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------|-------|
| 2015 <sup>e)</sup> | HH                | 132   | 235  | 7     | 182              | 81                                 | 0                         | 0                 | 637   |
|                    | GHD <sup>d)</sup> | 149   | 110  | 0     | 102              | 27                                 | 0                         | 0                 | 388   |
|                    | Industrie         | 228   | 247  | 119   | 90               | 32                                 |                           | 269 <sup>f)</sup> | 985   |
|                    | Verkehr           | 12    | 2    | 0     | 0                | 30                                 | 683                       | 0                 | 727   |
|                    | Summe             | 521   | 594  | 126   | 374              | 170                                | 683                       | 269               | 2.737 |
| 2030               | HH                | 131   | 252  | 0     | 52               | 74                                 | 0                         | 0                 | 509   |
|                    | GHD               | 138   | 96   | 0     | 38               | 20                                 | 27                        | 0                 | 319   |
|                    | Industrie         | 180   | 173  | 130   | 119              | 8                                  | 0                         | 285               | 895   |
|                    | Verkehr           | 44    | 0    | 0     | 0                | 0                                  | 666                       | 0                 | 710   |
|                    | Summe             | 493   | 521  | 130   | 209              | 102                                | 693                       | 285               | 2.433 |
| 2040               | HH                | 137   | 101  | 0     | 20               | 135                                | 0                         | 0                 | 393   |
|                    | GHD               | 133   | 41   | 0     | 19               | 37                                 | 23                        | 0                 | 253   |
|                    | Industrie         | 186   | 167  | 62    | 59               | 9                                  | 0                         | 285               | 768   |
|                    | Verkehr           | 101   | 0    | 0     | 0                | 0                                  | 472                       | 0                 | 573   |
|                    | Summe             | 557   | 309  | 62    | 98               | 181                                | 495                       | 285               | 1.987 |
| 2050               | HH                | 119   | 0    | 0     | 0                | 174                                | 0                         | 0                 | 293   |
|                    | GHD               | 128   | 0    | 0     | 0                | 83                                 | 19                        | 0                 | 230   |
|                    | Industrie         | 216   | 163  | 0     | 0                | 25                                 | 0                         | 285               | 689   |
|                    | Verkehr           | 131   | 0    | 0     | 0                | 0                                  | 350                       | 0                 | 481   |
|                    | Summe             | 594   | 163  | 0     | 0                | 282                                | 369                       | 285               | 1.693 |

a) Angaben auf ganze Zahlen gerundet. b) Insbesondere Umweltwärme. c) Inklusive der national verursachten internationalen Verkehre (See- und Flugverkehr). d) Abweichend zu den Szenarienergebnissen sind die historischen Kraftstoffbedarfe im GHD nicht separat aufgeführt. e) (UBA 2016d), f) (BMW 2017d)

Quelle: Modellrechnungen

### 2.3 Energieversorgung

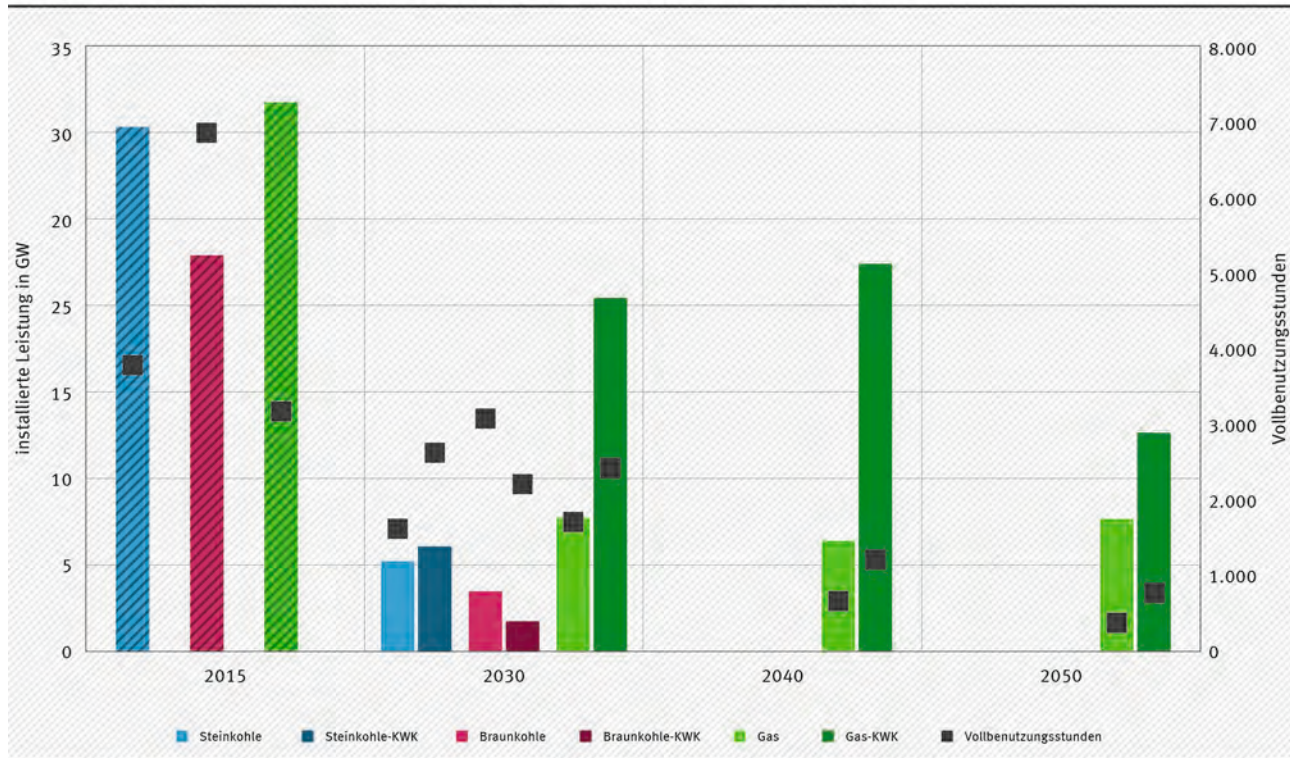
Zur sicheren und nachhaltigen Bereitstellung der in Kapitel 2.2 „Endenergienachfrage“ aufgezeigten Energiebedarfe wird ein sehr ambitionierter und kontinuierlicher Ausbau der erneuerbaren Energien, vor allem zur Strombereitstellung, benötigt. Bei der nationalen Strombereitstellung ist dies vor dem Hintergrund der Treibhausgasreduktion einhergehend mit der Reduzierung der Kohleverstromung. Im Szenario GreenEe beträgt der Anteil der Stromerzeugung aus Kohle im Jahr 2030 noch knapp 7%. Dabei wurde

unterstellt, dass im Wesentlichen durch ordnungsrechtliche Maßnahmen alle Steinkohlekraftwerke älter als 40 und alle Braunkohlekraftwerke älter als 30 Betriebsjahre außer Betrieb sind. Diese älteren Kraftwerke haben ihre einst hohen Investitionskosten erwirtschaftet und häufig bereits einen hohen Gewinn realisieren können. Durch die gleichzeitige Reduzierung von Braun- und Steinkohlenutzung, kann ein geordneter Strukturwandel in den Braunkohleregionen potenziell unterstützt werden. Die hohen notwendigen Treibhausgasminderungen der Energie-



Abb. 2.1

Entwicklung der konventionellen Kraftwerkstechniken und deren Auslastung<sup>a) b) c)</sup>



a) Die Angaben im Jahr 2015 sind nicht getrennt nach KWK und Nicht-KWK-Techniken und daher schraffiert dargestellt. Die installierten Leistungen sind Nettoleistungen. Werte für die installierte Nettoleistung 2015 sind von der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2017e). Werte für die Bruttostromerzeugung 2015 sind von der AGE (AGE 2017f) und umgerechnet über das Verhältnis von Netto- zu Bruttostromerzeugung aus dem Projektionsbericht 2017 (Bundesregierung 2017g). Die Vollbenutzungsstundenzahl wurde aus dem Verhältnis von Nettostromerzeugung und installierter Nettoleistung berechnet.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

b) In der Brennstoffkategorie „Gas“ sind sämtliche gasförmigen fossilen und erneuerbaren Brennstoffe zusammengefasst.

c) Die Angaben zu den Vollbenutzungsstunden stellen Mittelwerte dar.

versorgung führen zusätzlich zu den Stilllegungen zu einer relativ geringen Vollbenutzungsstundenzahl, insbesondere bei Braunkohlekraftwerken. Vor diesem Hintergrund wäre eine weitergehende Flexibilisierung der Kohlekraftwerke gegenüber heute oder eine weitere Reduzierung der Kohlekraftwerkskapazitäten erforderlich.

Bei den erneuerbaren Energien liegt das Augenmerk auf dem Ausbau der Wind- und Photovoltaik-Kapazitäten. Im Jahr 2050 trägt die Windenergie an Land rund 435 TWh und Photovoltaik -Anlagen rund 233 TWh, also insgesamt knapp 80% zur gesamten Bedarfsdeckung der Stromnachfrage bei. Vor dem Hintergrund der hohen langfristig zu deckenden Strombedarfe, vor allem bedingt durch die zunehmende Integration von Sektorkopplungstechniken mit direkter Stromnutzung, ist ein frühzeitiger Ausbau der erneuerbaren Energien unabdingbar. Bereits im Jahr 2030 ergeben sich im Szenario installierte Kapazitäten in Deutschland von etwa je 100GW Windenergie an Land und Photovoltaik.

Wind offshore sind bereits knapp 24 GW Leistung installiert, welche mit gut 70TWh zur Stromversorgung beiträgt. Die derzeitigen Ausbaukorridore Deutschlands sind für die Dekarbonisierung in den Anwendungsbereichen durch Sektorkopplung somit deutlich zu erhöhen. Zielorientierte Ausbaukorridore sollten die ganzheitliche Umstrukturierung der Energieversorgung und -anwendung, den Rückbau sowie einen möglichst stetigen Anstieg des Ausbauniveaus erneuerbarer Energieanlagen im Blick haben. Damit können den Akteuren Planungssicherheit und zukunftsfähige Perspektiven ermöglicht werden.

Am Beispiel der Windenergie an Land führt dies auf Basis des GreenEe-Szenarios dazu, dass der jährliche (Brutto-) Zubau von ca. 3,7 GW in 2015 jährlich um ca. 250 MW/a gesteigert werden sollte. Im Jahr 2030 läge der Zubau somit bei etwa 7 GW/a Brutto. Der Nettozubau würde zwischen 2020 und 2030 im Mittel ca. 4 GW/a betragen. Angesicht der aktuell eingeschlagenen politischen Richtung, welche gesetzlich im Erneuerbaren-Energie-Gesetz eine Deckelung des



Bruttozubaubau bei 2,8 GW/a (bzw. 2,9 GW/a in 2019 und 2020) vorsieht, wird deutlich, dass hierdurch ein erheblicher „Nachholbedarf“ notwendig würde, um das im Szenario vorgesehene Klimaschutzniveau zu erreichen. Erfolgt keine zeitnahe Anpassung der Ausbaukorridore, welche den Anforderungen der Sektorkopplung gerecht werden, bedarf es einer erheblichen Steigerung des Ausbaus zwischen 2020 und 2030. Konkret müssten diese von 2,9 auf ca. 11 GW/a Brutto ansteigen, um die Ergebnisse des GreenEe-Szenarios in 2030 erreichen zu können. Extreme Ausbauspitzen (z. B. 11 GW/a) ziehen am Ende ihrer Lebensdauer durch Ersatz der rückgebauten Anlagen auch Folgepitzen im Ausbau nach sich. Eine frühzeitige Stetigkeit und Erhöhung der Ausbaupfade reduzieren dementsprechende Anpassungsfriktionen und verstetigen den Ersatz von rückgebauten Kapazitäten. Hierdurch können alle Akteure trotz der hohen notwendigen Klimaschutzambitionen planbar und nachhaltig wirtschaften. Auch vor dem Hintergrund weniger ambitionierter Klimaschutzanforderungen bedürfen die derzeitigen Ausbaukorridore der erneuerbaren Energien einer Erhöhung, allein durch Rückbau von Anlagen, welche das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Diese ist schon allein aus industriepolitischen Gründen anzustreben.

Bei der Wasserkraft wird davon ausgegangen, dass das technisch-ökologische Potenzial weitestgehend ausgeschöpft ist. Es wird unterstellt, dass bis

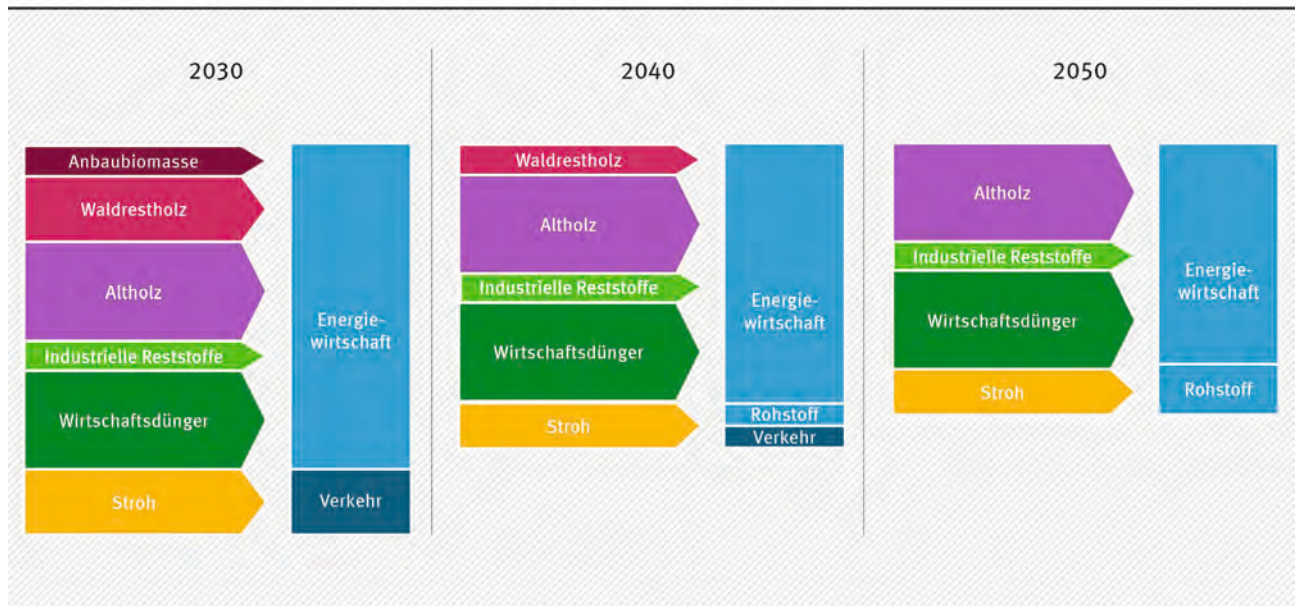
2030 durch Modernisierungen und Erweiterungen bestehender Anlagen der Energieertrag auf 24 TWh/a erhöht werden kann.

Der Anbau von Biomasse zum alleinigen Zweck einer energetischen Nutzung wird wegen der Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen und negativen Auswirkungen auf Wasser, Boden, Biodiversität und Naturschutz als auf Dauer nicht vertretbar erachtet. Vergärbare Biomassen aus Reststoffströmen, wie bspw. Wirtschaftsdünger werden hingegen auch langfristig einen Beitrag zur Energieversorgung leisten. Unter Berücksichtigung der Annahmen im Bereich Landwirtschaft (siehe Kapitel 2.7), u. a. zu den Haltungsarten der Wirtschaftstiere, ergibt sich 2050 noch ein Biogaspotenzial von rund 30 TWh. Altholz wird als biogener Reststoff am Ende einer Kaskadennutzung energetisch verwertet. Die energetische Nutzung von Waldrestholz sinkt bis 2050 auf null. Entsprechend der Annahmen im Bereich der Waldbewirtschaftung (siehe Kapitel 2.7) wird davon ausgegangen, dass dieser Stoffstrom aus Gründen der Ressourcenschonung stofflich genutzt wird oder zur Sicherung der Nährstoffnachhaltigkeit im Wald verbleibt.

Auch Stroh ist grundsätzlich für eine stoffliche Verwendung geeignet, insbesondere im Baubereich (Dämmung, Trockenbaumaterial). Gleichwohl ist dies vor dem Hintergrund des Brandschutzes nicht unumstritten, so dass im Szenario davon ausgegangen

Abb. 2.2

**Qualitative Darstellung zur energetischen Nutzung biogener Reststoffe\***



\* Strohnutzung wird 2050 ausschließlich als Rohstoff in der chemischen Industrie unterstellt.

Quelle: eigene Darstellung



wird, dass es vollständig zur Ethanolherstellung genutzt wird, da dieser Energieträger in mehreren Bereichen Anwendung finden kann. Dabei wird unterstellt, dass 2030 die Verwendung im Verkehr erfolgt und so ein Beitrag zur Quotenerfüllung der Mindestanteile an erneuerbaren Energien geleistet wird, die voraussichtlich mit der Fortschreibung der RED (Renewable Energy Directive) vereinbart werden. In der nachfolgenden Dekade wird die kontinuierlich zunehmende Verwendung von Stroh in der chemischen Industrie angenommen, so dass im Jahr 2050 ausschließlich dort ein Beitrag zur Bedarfsdeckung geleistet wird.

Die energetische Biomasse wird im Laufe des Transformationsprozess zunehmend auf die in einer nachhaltigen Wirtschaft anfallenden Reststoffmengen reduziert. Der Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung wird aufgrund der zunehmenden Konkurrenz um fruchtbare Anbauflächen, der unverhältnismäßig hohen Flächenintensität der Energiegewinnung aus Anbaubiomasse im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energiequellen und der sozioökonomisch problematischen Verknüpfung mit den Lebensmittelpreisen am Weltmarkt (UBA 2014a, UBA 2013a) sukzessiv entsprechend der heute im Bestand befindlichen Anlagenlebensdauern reduziert. Eine energetisch effiziente Verwertung erfolgt langfristig durch Nutzung von Klärgas, Altholz und Wirtschaftsdünger.

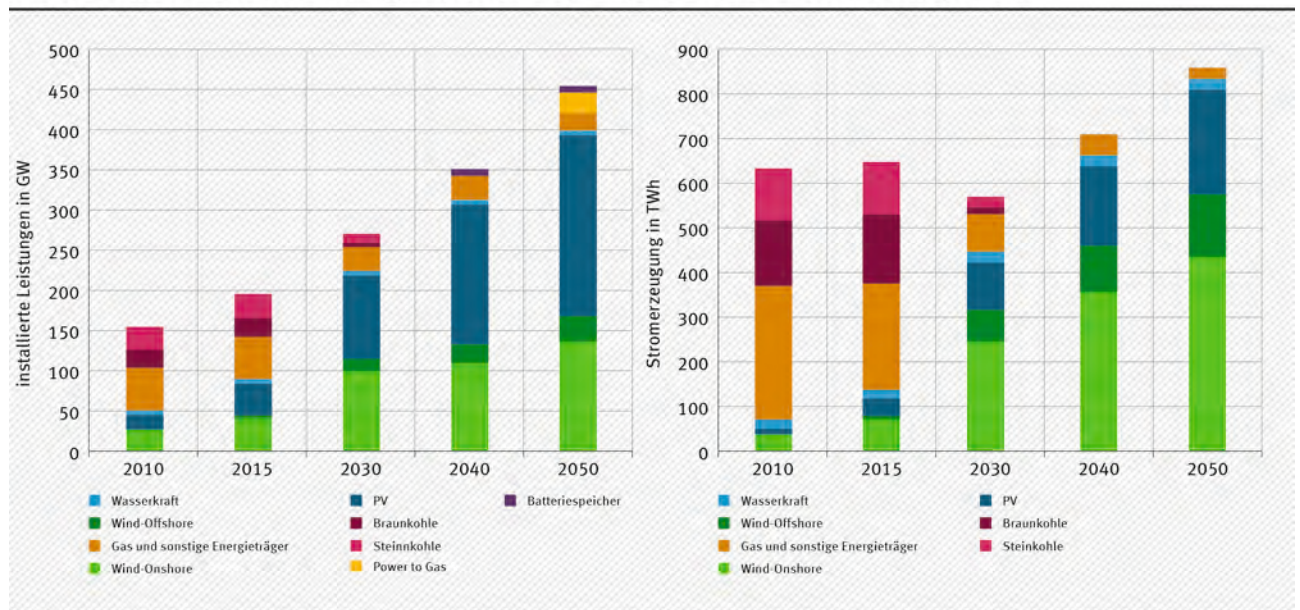
In Abbildung 2.3 ist die Entwicklung der Stromerzeugungskapazitäten und der Stromerzeugung dargestellt. Daraus wird deutlich, dass zur Bereitstellung des Endenergiebedarfs an Strom und Gas (siehe Kapitel 2.2) die nationale Stromerzeugung in Deutschland kontinuierlich ansteigt und 2050 die Nettostromerzeugung etwa 40 % über der aus dem Jahr 2015 liegt. Gleichwohl ist festzuhalten, dass aus gesamtsystemischer Sicht die direkte Nutzung von Strom, dort wo dies technisch umsetzbar ist, notwendig ist. Nur so kann der Bedarf an erneuerbaren Energieanlagen und die damit verbunden Ressourcenbedarfe begrenzt werden.

Unter Berücksichtigung möglicher Flexibilisierungen der Stromnachfrage im Bereich Elektromobilität, Wärmeversorgung und Elektrolyse zur Wasserstoffherstellung in der Industrie resultieren im Szenario Kapazitäten an konventionellen Kraftwerken (Gasturbinen und GuD-Anlagen) von 20 GW im Jahr 2050



Abb. 2.3

Entwicklung der Stromerzeugungskapazitäten (links) und der Stromerzeugung (rechts)\*



\* Die historischen Werte der linken Grafik sind (BMWi 2017, UBA 2017) entnommen.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

Tab. 2.2

Anteil der erneuerbaren Energien der Endenergieträger im GreenEe-Szenario

|      | Strom | Brenn- und Kraftstoffe | Rohstoffe* |
|------|-------|------------------------|------------|
| 2030 | 78 %  | 6 %                    | 5 %        |
| 2040 | 93 %  | 69 %                   | 48 %       |
| 2050 | 100 % | 100 %                  | 100 %      |

\* Nicht-energetischer Bedarf.

Quelle: Modellrechnungen

neben den Pumpspeichern (10 GW) und Kurzfristspeicher (Batterie) von knapp 8 GW.

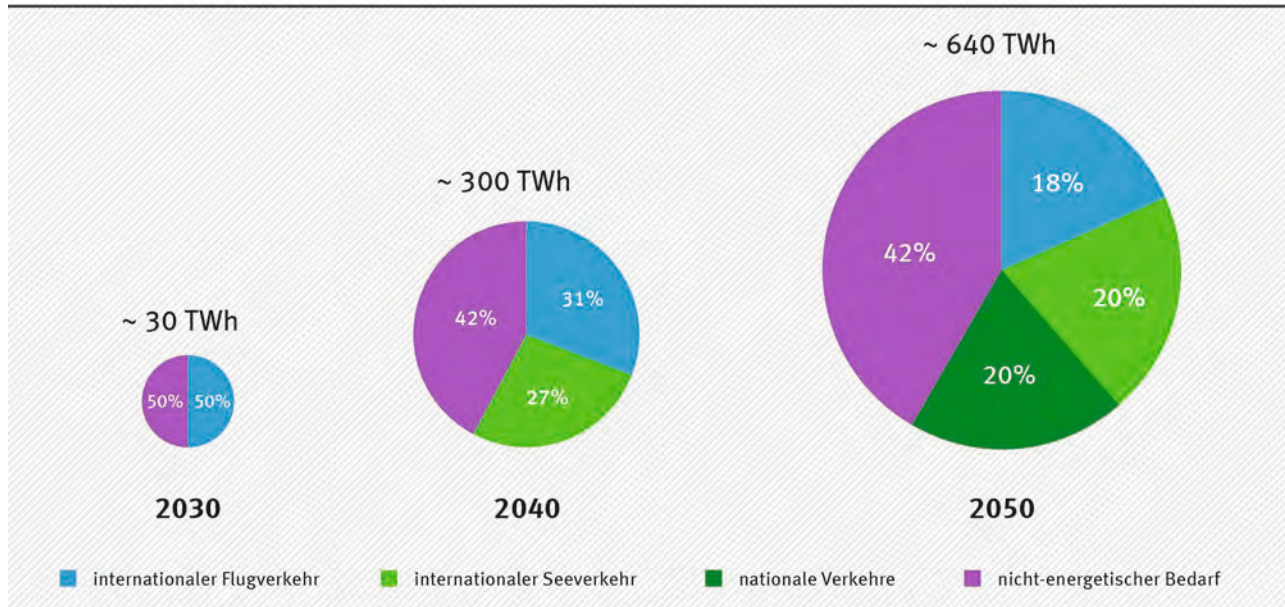
Der Anteil erneuerbarer Energien in der Strombereitstellung muss bereits frühzeitig sehr hoch sein, um die Substitutionseffekte und damit Treibhausgasminderungseffekte der PtX-Techniken im hohen Umfang zu gewährleisten. Dieser beträgt bereits 2030 knapp 78%. Die Integration der erneuerbaren Energien in die Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung geht dagegen deutlich langsamer voran, wie in Tabelle 2.2 ersichtlich ist.

Importe

Auch das internationale gemeinschaftliche Vorschreiten ist für eine vollständige auf treibhausgasneutralen Energien basierende Versorgung in Deutschland von großer Bedeutung. Schon in der UBA Studie zum „Treibhausgasneutralen Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014a) wurde Deutschland nicht als „Insel“ betrachtet, welches sich autark mit Energie versorgt. Vielmehr ist insbesondere vor dem Hintergrund des internationalen Bekenntnisses zum Klimaschutz mit dem Pariser Abkommen davon auszugehen, dass auch global eine ambitionierte Klimaschutzpolitik umgesetzt wird und sich Energiemärkte für regenerative Energieträger entwickeln. Im Jahr 2015 betrug die Importabhängigkeit rund 70% (AGEB 2017h). Die Importe sind nahezu ausschließlich fossilen Ursprungs, wobei insbesondere die derzeitigen Bedarfe an Mineralöl, Erdgas und Steinkohle nahezu vollständig importiert werden. Auch in einem regenerativen Energiesystem werden sich diese Strukturen nicht fundamental ändern. Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit deutscher Standorte im internationalen Kontext wird weiterhin davon ausgegangen, dass ein Großteil der Brenn-, Kraft- und Rohstoffe (also flüssige und gasförmige regenerative Endenergieträger) importiert werden. Konkret wird unterstellt, dass insbesondere der Verkehr (nationaler Personen- und Güterverkehr, internationaler Flug- und Seeverkehr) sowie die chemische Industrie mit

Abb. 2.4

**Importverteilung im GreenEe-Szenario**



Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

Rohstoffen durch Importe versorgt werden. Es ergibt sich im Jahr 2050 eine Importabhängigkeit von rund 60% bezogen auf die Nettostromerzeugung<sup>4</sup>.

Eine besondere Bedeutung haben heute erdölbasierte Produkte der chemischen Industrie, deren energetische Verwertung am Ende einer Kaskadennutzung und vor dem Hintergrund erhöhter Recyclingraten auch teilweise erst nach 2050 erfolgen könnte. Daher wird empfohlen, insbesondere die langfristigen für die Treibhausgasemissionen relevanten Produktionen der chemischen Industrie schnell auf treibhausgasneutrale Rohstoffe umzustellen. Im GreenEe-Szenario werden daher bereits 2030 erneuerbare strombasierte Energieträger für den nicht-energetischen Bedarf der chemischen Industrie unterstellt. Gleichfalls besteht dringender Handlungsbedarf im Flugverkehr, wo die International Civil Aviation Organisation (ICAO) sich das Ziel gesetzt hat, den Zuwachs des Flugverkehrs ab 2020 treibhausgasneutral zu gestalten. Neben einer globalen marktbasieren Maßnahme (GMBM) verfolgt die ICAO derzeit als zentrale Strategie zur Erreichung des treibhausgasneutralen Wachstums den Einsatz von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse. Dies lehnt das UBA aus klima- und umweltpolitischen Gründen ab, so dass auch bereits in diesem Anwendungsbereich frühzeitig Kraftstoffe aus regenerativen

PtL-Anlagen zum Einsatz kommen (UBA 2016a). Im GreenEe-Szenario wird daher im Jahr 2030 unterstellt, dass hälftig die regenerativen Erzeugnisse in der chemischen Industrie und im Flugverkehr genutzt werden. Im Verkehrsbereich wird eine Dekarbonisierung durch zunehmende Elektromobilität erreicht und erst in der Dekade nach 2040 erfolgt die Umstellung der verbleibenden Kraftstoffbedarfe auf regenerative importierte Energieträger.

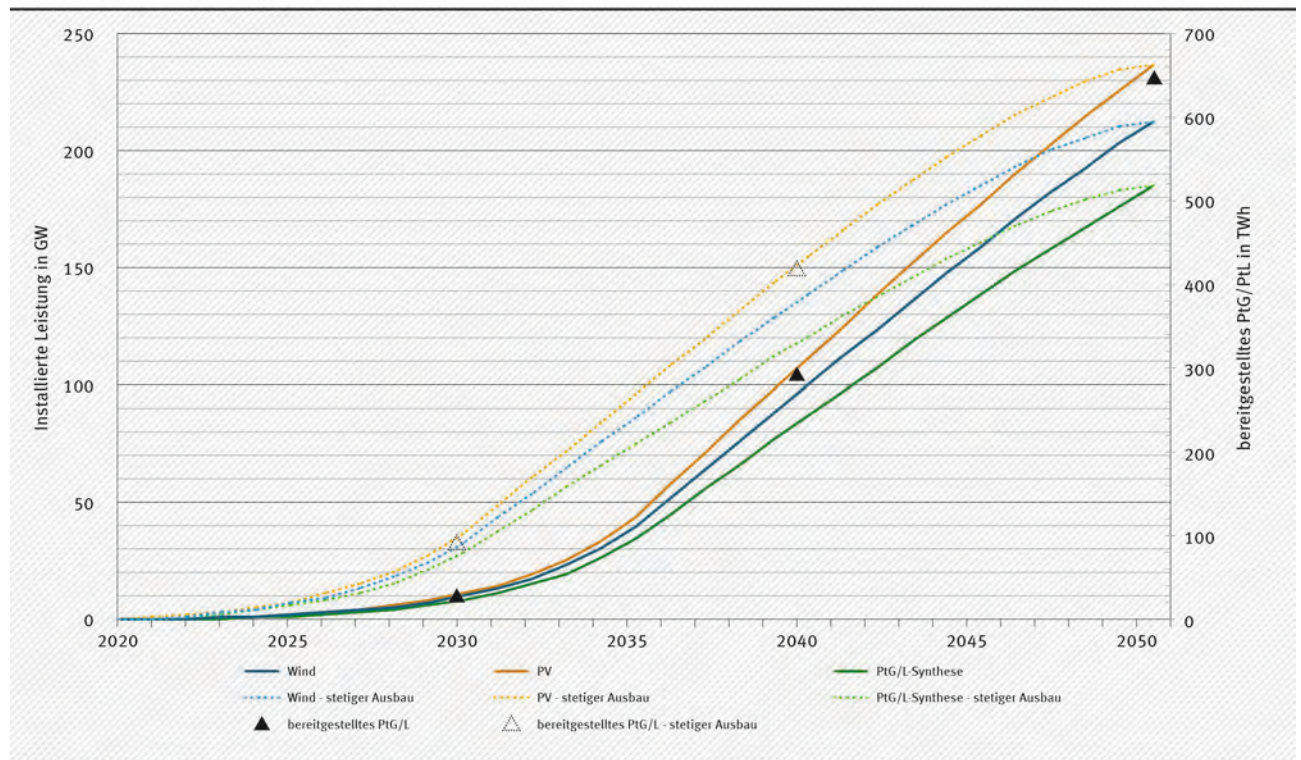
Unter Berücksichtigung der aufgezeigten langfristig benötigten Bedarfe wird deutlich, dass bereits 2030 PtL-Anlagen an kostengünstigen erneuerbaren Energienstandorten benötigt werden. Vor dem Hintergrund der momentan geringen Anzahl an konkreten internationalen Projekten bzw. Anlagen wird unterstellt, dass ein gleichmäßiger Ausbau der Kapazitäten bis 2050 bereits heute nicht mehr umsetzbar ist. Daher wird angenommen, dass insbesondere in der Dekade nach 2030 ein erheblicher Ausbau an internationalen erneuerbaren Stromgewinnungsanlagen mit anschließender Nutzung in PtG- und PtL-Anlagen erfolgt. Die notwendigen Ausbaupfade sowie der Vergleich zu einem wirtschaftspolitisch zweckmäßigen stetigen Ausbau sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

<sup>4</sup> Entspricht näherungsweise der heutigen Primärenergie.



Abb. 2.5

## Bereitstellung der Importe im GreenEe-Szenario\*



\* Beispielhaft am Standort Süd-Marokko und vereinfachend nur mit Wind onshore und Photovoltaik.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

## 2.4 Gebäude

Für Heizen und Warmwasser wird derzeit ein großer Anteil der Endenergie verbraucht. Konsequente Energieeinsparungen können diesen hohen Verbrauch wesentlich reduzieren – dazu gehört als zentrales Element die Sanierung des Gebäudebestandes. Das erleichtert es, die Wärmeversorgung zu einer treibhausgasneutralen Versorgung auf Basis regenerativer Energien umzustrukturieren.

Ein möglicher Transformationspfad hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland kann wie folgt aussehen. Grundsätzlich ist für eine ambitionierte Klimaschutzpolitik eine emissionsfreie und möglichst effiziente Wärmeversorgung notwendig. Das schließt viele Techniken von vornherein aus. Brennwertkessel kommen beispielsweise nicht in Frage, weil Methan aus erneuerbaren Energien herzustellen (nach heutigem Wissen) sehr ineffizient ist. Präferierte Lösungen sind damit Elektro-Wärmepumpen in einzelnen Häusern und Wärmenetze. Im GreenEe-Szenario wird unterstellt, dass der Absatz aller Wärmeerzeuger sich bis 2030 gegenüber dem heutigen Niveau verdoppelt und danach wieder leicht ab sinkt. Weitere Eckpunkte sind:

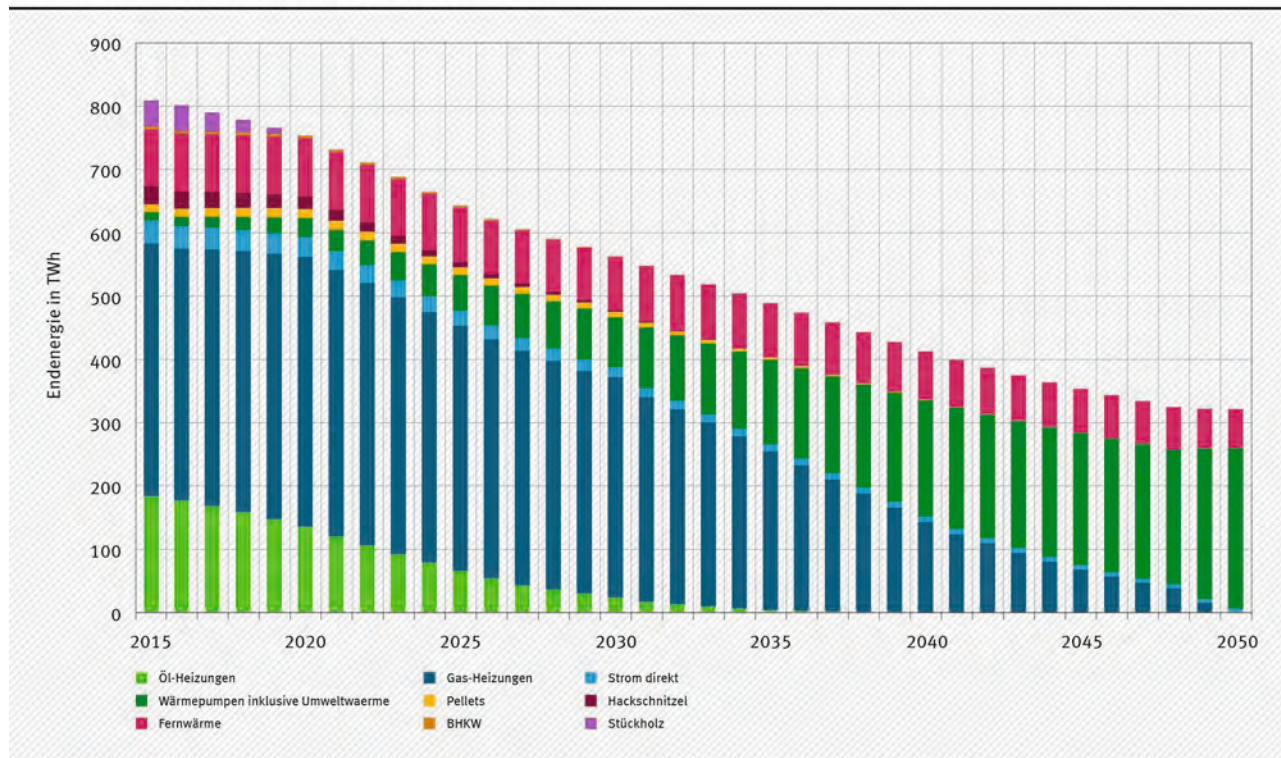
- ▶ ab 2020: Kein Neubau von Ölheizungen
- ▶ ab 2030: Kein Neubau dezentraler Heizungen mit biogenen Brennstoffen
- ▶ ab 2040: Kein Neubau von Gasheizungen

Die künftige Anlagentechnik muss sich nach der Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Quellen richten. Um dieser Flexibilisierung gerecht zu werden, wird ein Verschiebepotenzial des Stromverbrauchs um etwa sechs Stunden für Raumwärme mittels Wärmepumpen und etwa zwei Stunden für Klimakälte angenommen. Wohngebäude können mit passiven Maßnahmen kühl gehalten werden und erhalten daher in diesem Szenario grundsätzlich keine Klimatisierung.

Die Pro-Kopf-Wohnfläche steigt im Szenario bis 2030 leicht an und bleibt dann bis 2050 bei etwa 49 m<sup>2</sup> pro Person nahezu konstant. Die Wohnfläche beträgt damit 2050 insgesamt 3,5 Mrd. m<sup>2</sup>. Die Nettogeschossfläche in Nichtwohngebäuden steigt von 2,3 auf 2,5 Mrd. m<sup>2</sup> leicht an. Rohstoffseitig stützt sich das GreenEe-Szenario im Bereich Hochbau auf das Szenario „Nachhaltigkeit und Recycling“ in der

Abb. 2.6

**Entwicklung des Endenergiebedarf für Raumheizung und Warmwasser für den gesamten Gebäudebestand nach Art der Heiztechnik im GreenEe-Szenario**



Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

Tab. 2.3

**Nutzenergie- und Endenergiebedarf (inkl. Umgebungswärme) in Wohn- und Nicht-wohngebäuden 2050**

| TWh/a            | Nutzenergie |            |       | Endenergie |            |       |
|------------------|-------------|------------|-------|------------|------------|-------|
|                  | Raumwärme   | Warmwasser | SUMME | Raumwärme  | Warmwasser | SUMME |
| Wohngebäude      | 120,6       | 40,1       | 160,7 | 142,3      | 81,4       | 224   |
| Nichtwohngebäude | 62,3        | 8,7        | 71    | 71,5       | 27,5       | 99    |
| - GHD            | 58,3        | 5,7        | 64    | 65,4       | 19,4       | 84,8  |
| - Industrie      | 4           | 3          | 7     | 6,1        | 8,1        | 14,2  |

Quelle: Modellberechnungen

Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau (Deilmann, Gruhler und Krauß 2014c), angepasst auf die hier getroffenen Annahmen hinsichtlich Wohnflächenentwicklung und energetischen Sanierung<sup>5</sup>.

Weitestgehend werden sehr hohe Sanierungsstandards auf Passivhaus- Niveau unterstellt. Die energie-

tische Sanierungsrate beträgt im Mittel über die Zeit bis 2050 von 2,6 %, ansteigend von 2,2 % (2020) auf 3 % (2050). Die mittlere Raumtemperatur wird mit 20,5 °C angenommen.

Mit diesen Klimaschutzmaßnahmen kann der Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser bis 2050 um etwa 60 Prozent sinken (Abbildung 2.6). Bei schwer sanierbaren Gebäuden sinkt der Endenergiebedarf beispielsweise durch Innendämmung, jedoch weniger stark als im Durchschnitt. Hohe Dämm-

<sup>5</sup> Es ist beabsichtigt eine aus Rohstoffperspektive optimierte Ausgestaltung der energetischen Gebäudesanierung in einem der noch ausstehenden Szenarien zu betrachten.



standards der anderen Gebäude gleichen dies aus (UBA 2016i). Wärmepumpen und leitungsgebundene Wärme verdrängen Ölkessel und Gaskessel vollständig aus der Heizwärmeversorgung, auch bei schwer sanierbaren Gebäuden. Wärmepumpen stellen 75 Prozent der Heizwärme bereit, Fernwärme und KWK-Wärmepumpensysteme knapp 23 Prozent.

Etwa zwei Drittel des Bedarfs an Nutzenergie und Endenergie stammen aus Wohngebäuden, davon wiederum 20 bzw. 30 Prozent für die Warmwasserbereitung. Bei den Nichtwohngebäuden ist der Warmwasser-Anteil geringer (Tabelle 2.3).

Die hohen energetischen Standards führen dazu, dass 2050 die meiste Energienachfrage aus Gebäuden mit einem Raumwärmebedarf unter  $50 \text{ kWh/m}^2$  stammt (93 Prozent der Wohngebäude, 96 Prozent der Nicht-Wohngebäude). Nur noch einzelne Gebäude (unter 1 Prozent), z. B. denkmalgeschützte Häuser, liegen über einem Heizwärmebedarf von  $120 \text{ kWh/m}^2$ . 2050 beträgt der mittlere Endenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser  $52 \text{ kWh/m}^2$  für Wohngebäude und  $34 \text{ kWh/m}^2$  für Nicht-Wohngebäude.

Das Szenario verdeutlicht, dass der Schlüssel bei Gebäuden darin liegt, die geschilderten Sanierungsraten und Sanierungsstandards in der Breite zu erreichen. Beide sind heute noch weit von diesen Werten entfernt. Auch aus Rohstoffperspektive ist die schnelle Umsetzung hoher Sanierungsstandards positiv zu bewerten, da der zeitweise erhöhte Rohstoffbedarf der Dämmmaterialien durch Einsparungen von Rohstoffen zur Energieversorgung, zunächst fossile Energieträger und später dann Rohstoffe zum Aufbau von erneuerbaren Energien, kompensiert werden kann (Ritthoff, et al. 2015d). Darüber hinaus müssen sich die Marktanteile der Heiztechniken verschieben: weg von Gas- und Ölkesseln hin zu Elektro-Wärmepumpen und Fernwärme. Hinzu kommt der Umstand, dass Veränderungen nur langsam den Gebäudebestand durchdringen. Zielführende Standards und Rahmenbedingungen, vor allem aber ausreichende Kapazitäten in fachlicher wie personeller Hinsicht müssen schnell geschaffen werden.



## 2.5 Verkehr

Der Schlüssel zur Gestaltung eines treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Verkehrs liegt in einer Kombination aus Verkehrswende mit Vermeidung, Verlagerung und Verbesserung der Energieeffizienz sowie einer Energiewende im Verkehr – also der vollständigen Abkehr von fossilen Energieträgern. Die Verkehrswende senkt den Energieverbrauch des Verkehrs und damit den Bedarf an erneuerbaren Energien im Verkehr und ermöglicht so erst eine Energiewende. Beides muss daher Hand in Hand gehen.

Wichtige Ausgangspunkte des GreenEe-Szenarios sind die aktuellen Prognosen zukünftiger Verkehrsentwicklungen, die im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung erstellt wurden (Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (BMVI 2014b)), sowie Ergebnisse der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ (UBA 2016b). Konkrete Handlungsfelder sind dabei:

- ▶ Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, zur Verlagerung von Verkehr auf klima- und energieeffiziente Verkehrsträger sowie zur effizienteren Verkehrsabwicklung – einschließlich des Ausbaus der dazu notwendigen Verkehrsinfrastruktur (UBA 2016b, UBA 2017a) und
- ▶ Anreize zur Steigerung der Energieeffizienz (z. B. CO<sub>2</sub>-Flottenzielwerte) bei allen Verkehrsmitteln (UBA 2016b, UBA 2016c, UBA 2017a).

Eine detaillierte Beschreibung der Maßnahmen im Einzelnen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf Fahr- und Verkehrsleistungen sind in der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ veröffentlicht (UBA 2016b, UBA 2017a). Hierzu gehören beispielsweise der Ausbau einer nachhaltigen Verkehrsinfrastruktur, der Abbau umweltschädlicher Subventionen oder die Weiterentwicklung der fahrleistungsabhängigen Maut.

Die Maßnahmen der Verkehrswende können den Endenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Verkehrs bis 2050 gegenüber 1990 – je nach Umsetzungstiefe – zwischen 40 und maximal 60% reduzieren. Mit Blick auf Rohstoffbedarf, Umweltwirkungen und Kosten ist eine solche Senkung des Energieverbrauchs für eine Dekarbonisierung des Verkehrs als Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung in einem treibhausgasneutralen Deutschland zwingend erforderlich.

Eine Verkehrswende allein reicht damit jedoch nicht aus, eine Treibhausgasneutralität im Verkehr zu erreichen. Als weiterer Baustein muss der Verkehr durch eine Energiewende im Verkehr vollständig auf treibhausgasneutrale Energieträger umgestellt werden. In dieser sind:

- ▶ Verbrennungsmotoren – soweit technisch möglich – durch elektrische Antriebe zu ersetzen und
- ▶ fossile Kraftstoffe schrittweise durch treibhausgasneutrale zu substituieren.

Der Vorrang einer Elektrifizierung der Verkehrsmittel ergibt sich aufgrund der höheren Energie- und Kosteneffizienz im Vergleich zur Verwendung von treibhausgasneutralen Kraftstoffen in Verbrennungsmotoren (UBA 2016c). Deshalb ist es sinnvoll, entsprechende Effizienzpotenziale durch die Elektrifizierung schon zu realisieren, bevor zur Deckung des verbleibenden Bedarfs die aufwändigere Umstellung auf regenerative Kraftstoffe (im Wesentlichen auf PtL) erfolgt.<sup>6,7</sup> Vor dem Hintergrund der langfristig benötigten hohen Bedarfe an treibhausgasneutralen, flüssigen Kraftstoffen muss diese Transformation gleichzeitig mit der Elektrifizierung der Verkehrsmittel erfolgen. Jedoch gibt es viele Bereiche des Verkehrs, die auch zukünftig nicht oder nur teilweise elektrifiziert werden können, wie etwa der internationale See- und Flugverkehr (UBA 2014a). Hier spielen dann treibhausgasneutrale Kraftstoffe die zentrale Rolle auf dem Weg zur Dekarbonisierung des Verkehrs.

In der Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Verkehr spielt die Elektrifizierung des Straßenverkehrs aufgrund des hohen Anteils am nationalen Endenergiebedarf und des hohen Substitutionseffektes von fossilen Energieträgern bereits im Zeitraum bis 2030 eine wichtige ergänzende Rolle zu den Maßnahmen einer Verkehrswende. Im Bereich der Pkw und leichten Nutzfahrzeuge (LNF) werden im vorgestellten GreenEe-Szenario daher

6 Für die spezifischen Energieverbräuche (außer Seeschifffahrt) werden die identischen Annahmen zur Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ (UBA 2016b) unterstellt. Für diese wurde der absolute Endenergieverbrauch wie in der Studie „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs“ angenommen (Szenario FL+) (UBA 2016c).

7 Zur Herstellung erneuerbarer flüssiger Kraftstoffe gibt es neben den – strombasierten – PtL-Verfahren und den biomassebasierten Verfahren auch solche, für die als Input sehr hohe Temperaturen erforderlich sind, aber kein Strom. Als Beispiel sei das sog. Sun-to-Liquid-Verfahren, erforscht im EU-Horizon 2020 Projekt, genannt.





- ▶ bis zum Jahr 2030 sowohl reine Elektrofahrzeuge als auch extern aufladbare Hybridelektrofahrzeuge (Plug-in-Hybride) im Bestand stark zunehmen, so dass rund 8 Millionen Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen unterwegs sein werden und das Ziel der Bundesregierung von 6 Millionen Elektrofahrzeugen klar übertroffen wird und
- ▶ bis zum Jahr 2040 der Anteil der Elektrofahrzeuge an den Neuzulassungen so anwachsen, dass der Marktdurchdringung weitgehend abgeschlossen sein wird.

Um eine entsprechend schnelle Marktdurchdringung der Elektromobilität im Bereich der Pkw und LNF zu erreichen, werden anspruchsvolle

Energieeffizienzziele in Ergänzung zu den EU-CO<sub>2</sub>-Flottenwerten für neue Fahrzeuge und eine Quote für Elektrofahrzeuge notwendig werden. Parallel erfolgt der großflächige Aufbau der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge.

Auch im Straßengüterverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen (SNF) wird bis 2050 eine Elektrifizierung stattfinden. Sie ist allerdings eingeschränkt durch das zusätzliche Batteriegewicht bei rein elektrischen Fahrzeugen sowie dem dadurch verringerten Ladevolumen. Daher kommen elektrische Lkw (rein elektrisch bzw. extern-aufladbare Hybridelektrofahrzeuge) nur im Nah- und Regionalverkehr und Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH-Lkw) mit Stromabnehmer und



Dieselmotor im Fernverkehr zum Einsatz. Im Bereich der OH-Lkw wird im Szenario unterstellt, dass

- ▶ schnellstmöglich entlang der stark befahrenen Autobahnabschnitte Oberleitungsinfrastrukturen errichtet werden, um zu gewährleisten, dass ein ausreichend dichtes Netz als Voraussetzung für die Markteinführung von OH-Lkw besteht, und
- ▶ zwischen den Jahren 2030 und 2040 der Anteil der OH-Lkw bei den Neuzulassungen im Bereich der schweren Solo-Lkw (20–28 t zulässiges Gesamtgewicht/zGG) und der Last/Sattelzüge (bis 40 t zGG) stark steigen wird (schnelle Marktdurchdringung).

Ab 2040 werden beispielsweise Last- und Sattelzüge ausschließlich als Elektrofahrzeuge (extern aufladbare Hybride und OH) neu zugelassen. Sowohl OH-Lkw als auch extern aufladbare Hybrid-Lkw können jedoch nur einen Teil der Fahrleistung elektrisch erbringen und sind für den verbleibenden Anteil der Fahrleistung weiterhin auf flüssige, postfossile Kraftstoffe angewiesen. In dem vorgestellten Szenario kommt dabei PtL zum Einsatz.

Aus Sicht der Rohstoffbedarfe sind Elektrofahrzeuge derzeit gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor im Nachteil. So weist ein durchschnittlicher Kompaktwagen mit Elektromotor aktuell einen um rund 75 % höheren Primärrohstoffeinsatz<sup>8</sup> auf. Dies ist im Wesentlichen auf den erhöhten Rohstoffbedarf der Batterie, den gesteigerten Bedarf an Metallrohstoffen der Elektrokomponenten und aktuell auch dem Rohstoffbedarf der noch fossil geprägten Strombereitstellung geschuldet (UBA 2016m). Letzterer wird durch die, auch globale, Transformation hin zu erneuerbaren Energien deutlich reduziert. Hinsichtlich der Fahrzeugbatterien wird im GreenEe-Szenario eine Steigerung der Kapazität und Energiedichte sowie ein Technologiewechsel unterstellt, was zu deutlichen Rohstoffeinsparungen führt. Es wird festgelegt, dass alle Pkw und LNF bis 2030 die Li-Ion-Zelltypen Nickel-Kobalt-Aluminium, Nickel-Mangan-Kobalt und Lithium-Eisenphosphat (jeweils mit Graphitanode) in gleichen Anteilen einsetzen werden. Lkw nutzen bis 2030 auf Grund der geringeren Kosten lediglich

<sup>8</sup> Gemessen als kumulierter Rohstoffaufwand (KRA). Der KRA summiert sämtliche (inkl. biotische) über den Lebensweg eines Produktes eingesetzte Materialien nach ihrer Rohstoffmasse auf (bei den metallischen Rohstoffen ist dies z. B. das Gewicht des Erzes).



Lithium-Eisenphosphat-Akkus. Im Jahr 2050 kommen hingegen bei allen Straßenfahrzeugen ausschließlich Lithium-Schwefel-Akkus zum Einsatz. Neben der Wahl und Energiedichte des Akkus ist auch das Gewicht der Karosserie der Fahrzeuge für Rohstoffbetrachtungen relevant. Es wird im GreenEe-Szenario unterstellt, dass im Jahr 2030 durch Leichtbau eine Gewichtsreduktion um rund 10 % und im Jahr 2050 eine Gewichtsreduktion um 20 % bei neuen Pkw erreicht werden kann. Dies wird im Wesentlichen durch Einsatz von Aluminium und hochfesten Stählen sowie generelles Downsizing ermöglicht<sup>9</sup>. Für Nutzfahrzeuge wird ab 2030 eine Leergewichtsreduktion um 6 % bei den neuzugelassenen Solo-Lkw und 10 % bei Last- und Sattelzügen sowie LNF durch Leichtbau angenommen.<sup>10</sup>

Durch die starken Bemühungen zur Verlagerung von Gütertransporten auf den klimafreundlichen Güterverkehr wächst dessen Anteil am Modal-Split deutlich. Die Realisierung eines treibhausgasneutralen Schienenverkehrs ist vergleichsweise einfach, da dieser bereits heute zu großen Teilen elektrisch betrieben wird.

Die internationalen Flug- und Seeverkehre verursachen einen großen Teil des Endenergiebedarfes im Verkehr. Diese Bereiche sind nach heutiger Einschätzung der Technologieentwicklung selbst im Jahre 2050 nicht elektrifizierbar. Zur Erreichung eines treibhausgasneutralen Verkehrs ist daher der schrittweise Ersatz der Kraftstoffe fossiler Herkunft durch synthetische, treibhausgasneutrale Kraftstoffe notwendig (im Wesentlichen PtL). Dieser Prozess muss bis zum Jahr 2050 abgeschlossen sein.

Der Endenergiebedarf der Verkehrsmittel ergibt sich als Produkt des Verkehrsaufwands (gemessen in Personen- oder Tonnenkilometern) und des spezifischen Energieverbrauches. In der Zeit zwischen 2010 und 2050 muss insbesondere im Güterverkehr mit einem starken Wachstum des Verkehrsaufwandes gerechnet werden, wohingegen im Personenverkehr nur geringe Änderungen vorausgesagt werden. Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung, verlagerung und

verbesserung setzen sowohl beim Verkehrsaufwand als auch dem spezifischen Endenergieverbrauch an (UBA 2017a). Für die spezifischen Energieverbräuche – außer in der Seeschifffahrt – werden die Annahmen der UBA-Studie „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“ (UBA 2016b) übernommen<sup>11</sup>. Durch die starken Bemühungen zur Verlagerung von Gütertransporten auf klimafreundlichere, effizientere Verkehrsmittel wächst so zum Beispiel der Verkehrsaufwand im Schienengüterverkehr deutlich stärker als im Straßengüterverkehr, so dass der Anteil des Schienengüterverkehrs am Modal-Split steigt.

Der sich im Szenario ergebende Bedarf an Endenergie ist in Abbildung 2.7 nach Verkehrsmitteln und in Abbildung 2.8 nach Endenergieträgern dargestellt. Für den Straßenverkehr von Personen und Gütern kommt es trotz steigender Verkehrsleistung einiger Verkehrsmittel zu einer deutlichen Abnahme um ca. 25 % bis 2030 und ca. 65 % bis 2050 gegenüber 2010. Dies ist insbesondere auf die starke Elektrifizierung zurückzuführen. Dementsprechend ist der Anteil des Stromverbrauchs am nationalen Endenergiebedarf des Verkehrs im Jahr 2050 deutlich größer als der von Kraftstoffen. Als Endenergieträger werden neben Strom hauptsächlich treibhausgasneutrale Flüssigkraftstoffe (PtL) eingesetzt (UBA 2016c).

Im internationalen Flug- und Seeverkehr übersteigen die Wachstumsraten die Gewinne bei der Effizienz, so dass der Endenergiebedarf beider Verkehrsmittel bis 2050 gegenüber 2010 um ca. 25 % zunimmt. Das hat zur Folge, dass der Endenergiebedarf der internationalen Verkehre im Jahr 2050 genauso groß ist wie der nationale Gesamtbedarf von Straße, Schiene und Binnenschiff. Dies verdeutlicht die steigende Bedeutung des internationalen Flug- und Seeverkehrs beim Klimaschutz und zeigt die Herausforderungen auf. Die Energiewende im Verkehr muss daher auch in diesem Bereich angegangen werden. Im vorgestellten Szenario bedarf dies der Bereitstellung großer Mengen an aus erneuerbarem Strom erzeugten, treibhausgasneutralen PtL.<sup>12</sup>

9 Es ist beabsichtigt den Einsatz anderer Leichtbaumaterialien, wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), weitere konstruktive Leichtbauvarianten sowie weitere Maßnahmen zur Rohstoffeinsparung in einem der noch ausstehenden Szenarien zu berücksichtigen.

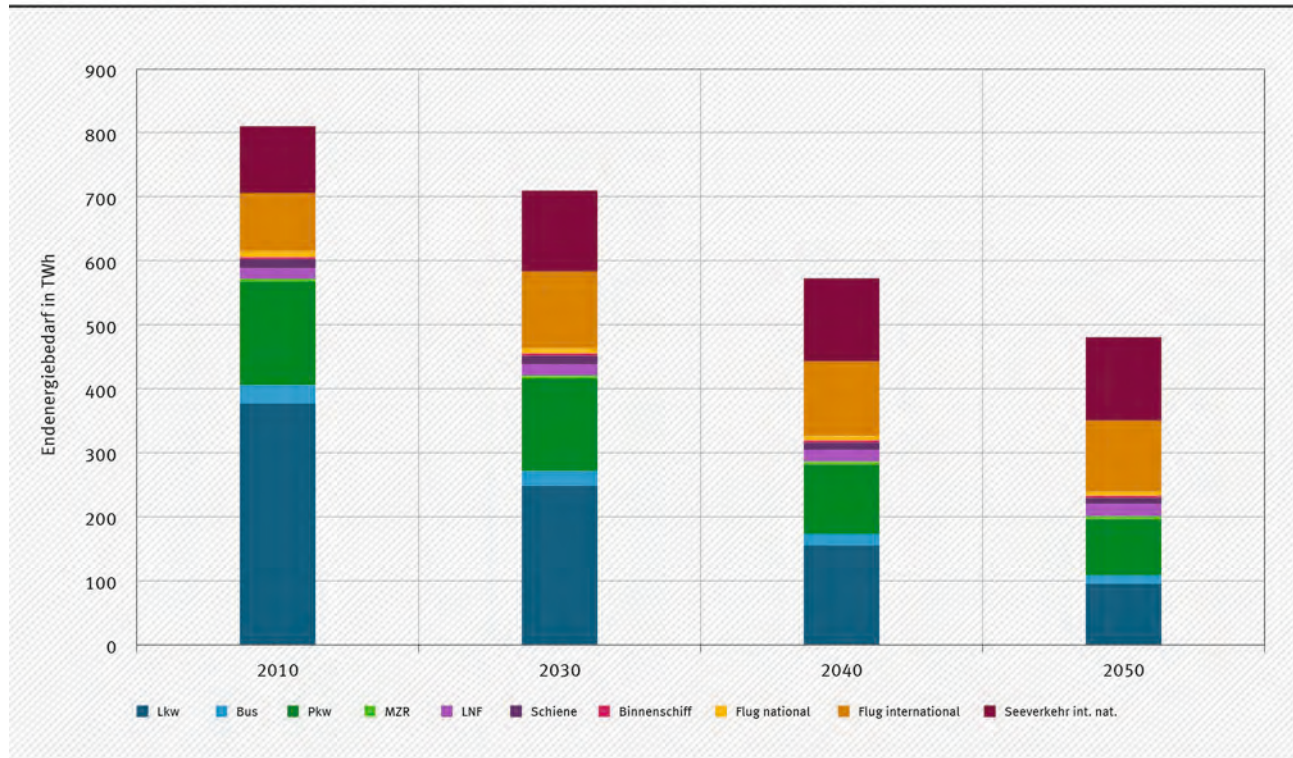
10 Hinsichtlich der übrigen Fahrzeugkomponenten, insbesondere der Elektrokomponenten, wird die Entwicklung von Materialeinsparungen, Anteil Sekundärrohstoffen und Rohstoffeffizienz analog zur Entwicklung in der Industrie unterstellt.

11 Der absolute Endenergieverbrauch entspricht den Daten der Studie UBA Texte 72/2016 (Szenario FL+) (UBA 2016c).

12 Das Ziel der Studie ist die ressourceneffiziente Minimierung der Treibhausgasemissionen, abgeleitet aus dem Erfordernis des Klimaschutzes. Gerade der Flugverkehr verursacht erhebliche klimawirksame Effekte, die nicht auf Treibhausgasemissionen zurückzuführen sind (UBA 2012a) Insbesondere in ökoeffizienten Flugtrajektorien liegen sehr große Potenziale um ein klimafreundlicheres Fliegen zu ermöglichen.

Abb. 2.7

**Endenergiebedarf des Verkehrs im GreenEe-Szenario nach Verkehrsmitteln\***

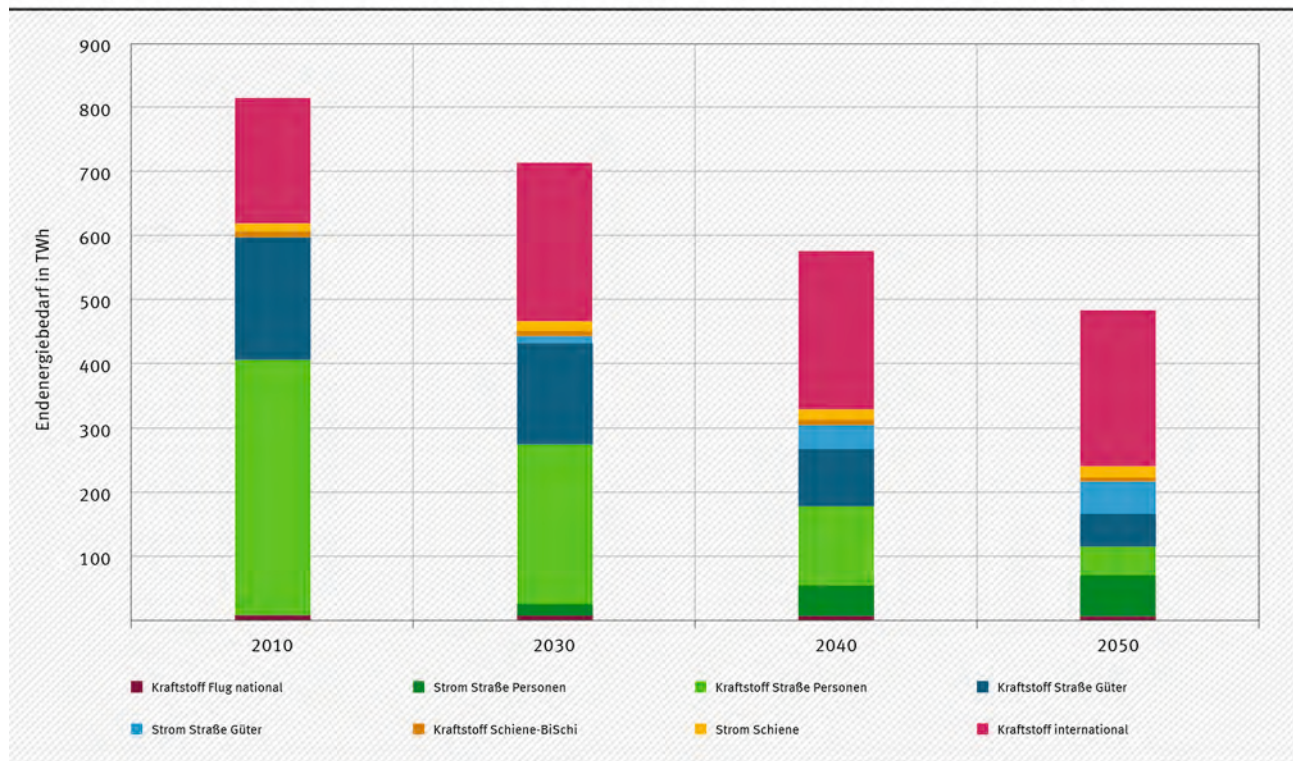


\* Die Kategorie „LNF“ umfasst die leichte Nutzfahrzeuge und die Kategorie „MZR“ die motorisierten Zweiräder.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

Abb. 2.8

**Endenergiebedarf des Verkehrs im GreenEe-Szenario nach Verkehrsmitteln und Energieträgern\***



\* Die Kategorie „Kraftstoff Schiene-BiSchi“ umfasst alle Kraftstoffe für den Schienenverkehr und Binnenschiffe.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen



## 2.6 Industrie

Industrie und Gewerbe (ohne die Anlagen zur öffentlichen Strom- und Wärmeerzeugung) sind einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen in Deutschland. Die direkten Treibhausgasemissionen von Industrie und Gewerbe<sup>13</sup> haben von 1990 bis 2010 zwar um 34 % abgenommen, mit 187 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq betrug ihr Anteil an den gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland 2010 aber weiterhin etwa 20 %. Ursache der direkten Treibhausgasemissionen aus Industrie und Gewerbe ist vor allem die Verwendung fossiler Brennstoffe zur Bereitstellung von Energie (Prozesswärme, Dampf, mechanische Arbeit). Bei einigen Industrieprozessen entstehen zudem prozessbedingte Treibhausgasemissionen aus der Verwendung kohlenstoffhaltiger Rohstoffe (z. B. Kalkstein), aus der nicht-energetischen Verwendung kohlenstoffhaltiger Energieträger (z. B. als Reduktionsmittel) oder aus der prozessbedingten Freisetzung anderer Treibhausgase als CO<sub>2</sub> (z. B. aus der Verwendung von Lösemitteln und fluorierten Gasen). Diese „prozessbedingten“ Emissionen machen insgesamt etwa ein Drittel der direkten Treibhausgasemissionen aus Industrie und Gewerbe aus. Weiterhin sind Industrie und Gewerbe durch ihren hohen Endenergieverbrauch (EEV), vor allem in Form von Strom, indirekt für einen erheblichen Anteil der Treibhausgasemissionen aus der Energiewirtschaft verantwortlich.

Die verschiedenen Ursachen von Treibhausgasemissionen, also direkte energiebedingte Treibhausgasemissionen und direkte prozessbedingte Treibhausgasemissionen erfordern jeweils spezielle Maßnahmen, um dem Ziel der Treibhausgasneutralität auch im Industriebereich nahe zu kommen. Eine besondere Herausforderung stellen die prozessbedingten Treibhausgasemissionen dar, weil diese – wenn überhaupt – dann nur durch grundlegende Verfahrensumstellungen oder die Substitution von Rohmaterialien gemindert werden können.

Industriell genutzte fossile Brennstoffe stellen die Hauptquelle direkter Treibhausgasemissionen im Industriesektor dar und dienen primär der Wärmeerzeugung, insbesondere der Erzeugung industrieller Prozesswärme (Temperaturen von unter 100°C bis über 1.500°C). Allein durch Effizienzverbesserungen lassen sich die energiebedingten

Treibhausgasemissionen nicht hinreichend mindern, dazu ist eine technische Umstellung der Prozesswärmeerzeugung auf CO<sub>2</sub>-freie bzw. CO<sub>2</sub>-neutrale Techniken erforderlich. Konkret wird daher davon ausgegangen, dass ein Großteil der Prozesswärmeerzeugung bis zum Jahr 2050 auf strombasierte Verfahren (Power to Heat) umgestellt wird. Nur da wo aus prozesstechnischen Gründen Strom nicht direkt als Energieträger genutzt werden kann, erfolgt die Verwendung von regenerativen Brennstoffen, welche mittels Power to Gas (PtG) bzw. Power to Liquid (PtL) gewonnen werden.

Die Nutzung von biogenen Brennstoffen für Industrieprozesse, in Form von Anbaubiomasse, kommt unter den Aspekten der Nachhaltigkeit – wie in der Energiewirtschaft – nicht für die industrielle Nutzung in Betracht. Biogene Reststoffe, können dagegen auch einen Beitrag zur Energieversorgung der Industrie leisten, beispielsweise fallen in der Papier- und Zellstoffindustrie prozessbedingt biogene Reststoffe an, deren direkte energetische Nutzung vor Ort weiterhin sinnvoll erscheint.

Für die Minderung der energiebedingten Treibhausgasemissionen ist zwingend erforderlich, dass die Integration von PtX-Techniken in der Industrie im Transformationsprozess gleichzeitig zur Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien erfolgt. Nur so können auch in der Industrie relevante Treibhausgasreduzierungen bei der Erzeugung von Prozesswärme erreicht werden. Einhergehend damit werden im Szenario große Anstrengungen zur weiteren Verbesserung der Energie- und Materialeffizienz in der Industrie unternommen, wie beispielsweise konsequente Abwärmenutzung.

Nachfolgend wird beschrieben, wie diese grundsätzlich dargestellten Treibhausgasreduzierungsmaßnahmen im GreenEe-Szenario für die verschiedenen Branchen hinterlegt wurden.

In Bezug auf die **Stahlindustrie** wird angenommen, dass die maßgeblich auf dem Einsatz von Schrott und Strom basierende Elektrostahlerzeugung in Lichtbogenöfen bis zum Jahr 2050 um etwa 100 % (auf etwa 27 Mio. t Rohstahl pro Jahr) gesteigert werden kann. Der verbleibende Bedarf an Rohstahl (18 Mio. t) muss weiterhin durch die Reduktion von Eisenerz gedeckt werden. Das soll allerdings nicht mehr mit Hilfe des koksbasierten Hochofenprozesses erfolgen,

<sup>13</sup> Eigene Berechnung nach NIR (deutscher Nationaler Inventarbericht) auf Basis von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für die Quellgruppen CRF 1.A.2. ("Manufacturing industries and construction") und 2. („Industrial processes and product use“).

weil dessen hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen verfahrensbedingt kaum gemindert werden können. Stattdessen soll die primäre Stahlerzeugung im Jahr 2050 in gasbasierten Direktreduktionsanlagen und anschließendem Schmelzvorgang im Elektrolichtbogenofen erfolgen. Solche Direktreduktionsanlagen gibt es bereits, vor allem in Ländern wo Erdgas billig ist, welches dann in einem ersten Verfahrensschritt in die chemisch wirksamen Reduktionsmittel Wasserstoff und CO umgewandelt wird. Es liegt also nahe, diese Anlagen direkt mit Wasserstoff zu betreiben, anstatt diesen zuerst energieaufwendig in Methan umzuwandeln und dann wieder in Wasserstoff und CO zu spalten. So lassen sich dann die bisher mit der Stahlerzeugung verbundenen Treibhausgasemissionen fast vollständig vermeiden. Im Szenario wird unterstellt, dass es kein flächendeckendes Versorgungsnetz für Wasserstoff geben wird, dementsprechend erfolgt die Wasserstoffbereitstellung ortsnah bei den Stahlwerken durch Elektrolyse auf Basis von erneuerbarem Strom und Wasser. Im Ergebnis entfällt der Bedarf der Stahlindustrie an fossilen Brennstoffen bis 2050 zwar vollständig, der Strombedarf der Stahlindustrie steigt aber deutlich auf etwa 47 TWh/a, zuzüglich eines Bedarfs von 66 TWh regenerativen Wasserstoffs<sup>14</sup>. Da Hochöfen üblicherweise bis zu 20 Jahren kontinuierlich in Betrieb sind, bevor sie für die nächste „Ofenreise“ ertüchtigt werden („Neuzustellung“), wird davon ausgegangen, dass mit dem Umbau des Anlagenparks spätestens 2030 begonnen wird, damit dieser in wirtschaftlich vertretbarer Weise bis 2050 abgeschlossen werden kann.

Für die **NE-Metallindustrie** wird angenommen, dass durch Effizienzverbesserungen, die Umstellung der Anlagen auf die Verwendung von PtG-Brennstoffen oder Strom sowie durch eine Steigerung des Anteils der Sekundärerzeugung (von bisher 56 % auf 90 %) trotz langfristig steigender Produktionsmenge die energiebedingten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 auf Null sinken und der Strombedarf um etwa ein Drittel auf 10 TWh/a abnimmt. Die prozessbedingten Treibhausgasemissionen aus dem Anodenabbrand sowie den sogenannten Anodeneffekten in der Primäraluminiumindustrie werden durch die Umstellung auf inerte Anoden bis 2050 auf Null reduziert.

Für die Gießereiindustrie wird angenommen, dass bei insgesamt leicht sinkender Produktionsmenge der Anteil der energieintensiveren NE-Metallgießereien an der Gesamtproduktion bis 2050 auf etwa 25 % ansteigt. Durch deutliche Verbesserungen bei der Energieeffizienz und die flächendeckende Umstellung auf strombetriebene Schmelzöfen können die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2050 vollständig vermieden und gleichzeitig der Strombedarf sogar leicht auf 6,5 TWh gesenkt werden. Prozessbedingte Treibhausgasemissionen aus dem Einsatz von Kohle als Aufkohlungsmittel können durch die Substitution mit PtG-/PtL-basierten Kohlenstoffträgern ebenfalls vermieden werden.

Die **Chemische Industrie** trägt nicht nur durch ihren Energieverbrauch und prozessbedingte Emissionen, sondern auch durch auf fossile Kohlenstoff basierende Produkte zu den Treibhausgasemissionen bei, weil ein Großteil dieses Kohlenstoffs nach der Nutzungsphase des Produkts z. B. durch Verbrennung oder biologischen Abbau zu CO<sub>2</sub> umgesetzt und im Bereich Abfall emittiert wird. In Bezug auf den Energiebedarf der chemischen Industrie wird angenommen, dass dieser bis 2050 insbesondere durch Umstellungen auf energieeffizientere Prozesse um 55 % gesenkt wird. Für den bisherigen Bedarf an fossilen Brennstoffen (Erdgas, Mineralölprodukte, Kohle) wird angenommen, dass diese bis 2050 vollständig durch Wasserstoff oder PtG-/PtL-Brennstoffe substituiert werden. Der nicht-energetische Bedarf der chemischen Industrie an kohlenstoffhaltigen Rohstoffen soll bis 2050 vollständig durch mittels PtG-/PtL erzeugte Kohlenwasserstoffe gedeckt werden. Für die langfristigen Minderungen im Abfallbereich bei der energetischen Verwertung ist vor dem Hintergrund der Langlebigkeit einiger Produkte und hoher Recyclingraten eine frühzeitige Substitution der kohlenstoffhaltigen Ausgangsstoffe dieser Produkte erforderlich. Im Szenario wird daher davon ausgegangen, dass bereits 2030 etwa rund 15 TWh des nicht-energetischen Bedarfes der chemischen Industrie für langlebige Produkte durch PtG-/PtL-Kohlenwasserstoffe gedeckt wird, siehe Kapitel 2.3.

Für die **Zementindustrie** wird angenommen, dass bei 50 % der bisherigen Produktionsmenge der Zementklinker durch neuartige Bindemittel substituiert wird. Diese neuen Verfahren verursachen nur 1/3 der prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum bestehenden Klinkerprozess, zudem wird ein

14 Für die Wasserstoffbereitstellung sind knapp 89 TWh Strom notwendig.

um 50% geringerer Energiebedarf erwartet. Für das herkömmliche Verfahren wird dagegen nur eine Senkung des thermischen Energiebedarfs um 10% und des Strombedarfs um 30% unterstellt. Hinsichtlich der Befuerung der Drehrohröfen wird davon ausgegangen, dass diese von Kohle sowie den bisher eingesetzten Ersatzbrennstoffen zunächst auf Erdgas und dann bis 2050 vollständig auf regenerativ erzeugtes Methan (aus Power to Gas) umgestellt werden. Falls bis 2050 weiterhin Abfälle für die Mitverbrennung zur Verfügung stehen, die nicht anders als thermisch verwertet werden können, würde sich der Bedarf an regenerativ erzeugtem Methan entsprechend reduzieren. Abweichend von (UBA 2014a) wird im Szenario nicht mehr von einer Abnahme des Klinkerfaktors ausgegangen, weil die bisher mengenmäßig bedeutendsten Klinkeraustauschstoffe Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) und Flugasche nach dem Umbau der Stahlindustrie (s. o.) und der Energiewirtschaft nicht mehr zur Verfügung stehen. Falls das nicht durch andere Substitute aufgefangen werden kann, wird der Klinkerfaktor bis 2050 von derzeit 0,77 auf etwa 0,9 ansteigen, d. h. für 2050 werden rund 4,6 Mio. t mehr Klinker benötigt als in (UBA 2014a) beschrieben, und der Endenergiebedarf sowie die prozessbedingten Emissionen der Zementindustrie nehmen weniger stark ab.

Die angenommenen Verfahrensänderungen in andere Industriesektoren führen im Szenario zu einem bis 2050 um 30% sinkenden Bedarf an Branntkalk, der zu einem entsprechend geringeren Energiebedarf und entsprechend geringen prozessbedingten Emissionen der **Kalkindustrie** führt. Auch hier wird der Brennstoffbedarf bis 2050 vollständig durch PtG-/PtL-Brennstoffe gedeckt.

Der Anteil der **fluorierten Treibhausgase** (F-Gase)<sup>15</sup> an den gesamten Treibhausgasemissionen beträgt bisher nur knapp 2%, aber mit leicht steigender Tendenz. Im Rahmen des Szenarios wird angenommen, dass die F-Gase bereits bis 2030 in nahezu allen Anwendungsbereichen zum Großteil durch andere Stoffe substituiert werden können, die kein oder ein wesentlich geringeres Treibhauspotenzial haben. Die gesamten Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und Anwendung von F-Gasen nehmen so bis



2030 schon um 87% ab und bis 2050 gehen sie auf etwa 9% der CO<sub>2</sub>Äq von 2010 zurück.

Die **Verwendung von Lösemitteln und anderen chemischen Produkten** in Industrie, Handwerk und Privathaushalten trägt durch direkte Emissionen von Lachgas (N<sub>2</sub>O) sowie über photochemische Prozesse in der Atmosphäre durch die Bildung von sekundären Treibhausgasen (Ozon) oder von treibhausrelevanten Aerosolen zum Treibhauseffekt bei. Im Szenario wird angenommen, dass diese Emissionen durch Stoffsubstitutionen sowie einen effizienteren (sparsameren) Einsatz der Produkte in allen Anwendungsbereichen bis 2050 um über 50% auf etwa 800.000 t CO<sub>2</sub>Äq gemindert werden.

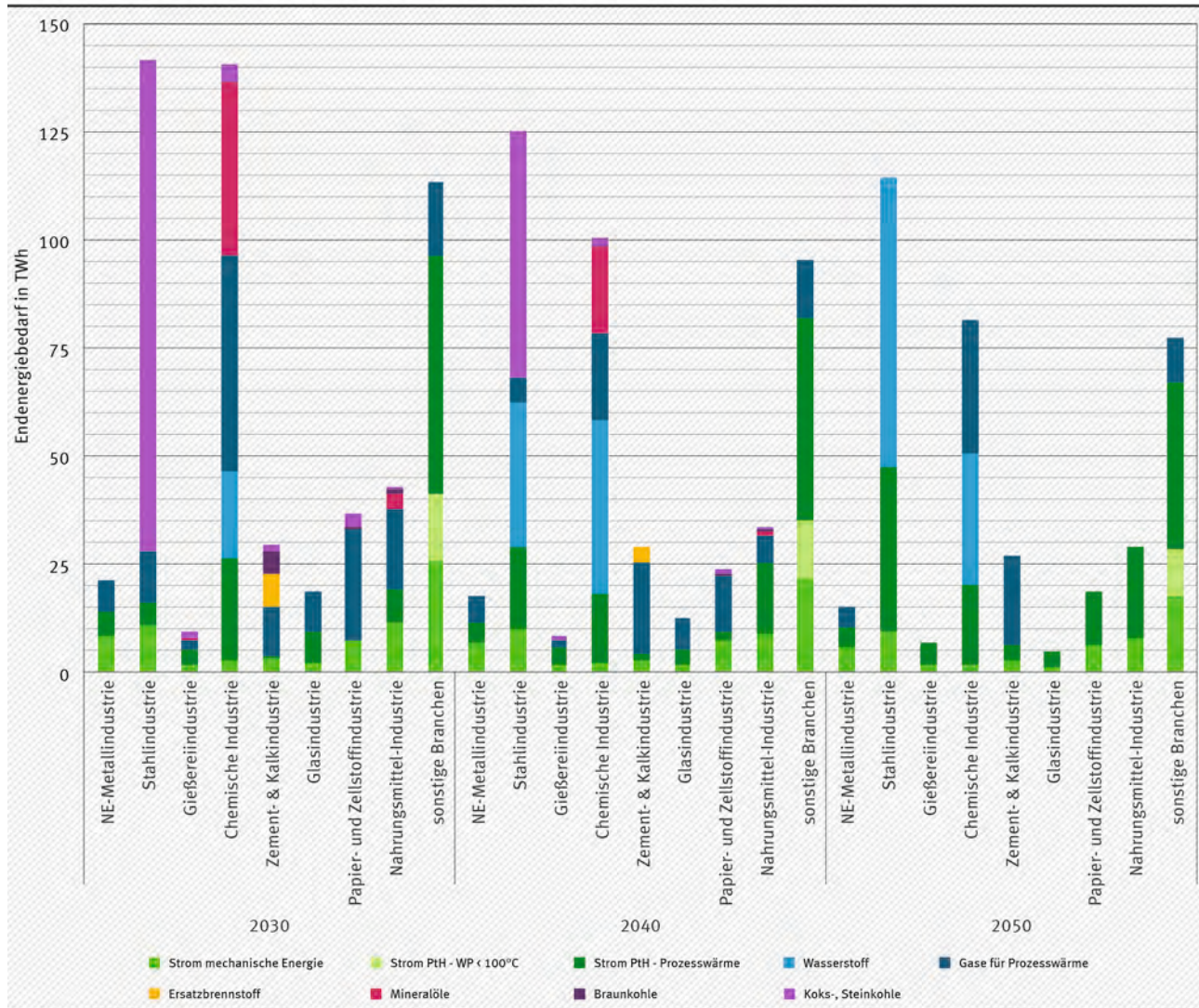
Die oben beschriebene Entwicklung der einzelnen Branchen sowie die Annahmen zu weiteren Branchen spiegeln sich in der Abbildung 2.9 wieder. Der Endenergiebedarf für alle energetischen Anwendungen, also inklusive der Bedarfe für Raumwärme, Warmwasser, Informations- und Kommunikationstechnik, Klimakälte sowie Beleuchtung, über alle Energieträger sinkt von 2010 bis 2050 kontinuierlich um rund 40% auf 438 TWh ab. Zu beachten ist, dass neben

15 Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe – HFKW, vollfluorierten Kohlenwasserstoffe – FKW und Schwefelhexafluorid – SF<sub>6</sub>.



Abb. 2.9

Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Industriebranchen im GreenEe-Szenario\*



\* In der Kategorie „Gase für Prozesswärme“ sind sowohl fossile als auch erneuerbare Gase außer Wasserstoff als Endenergie erfasst.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

der Umstellung der Industrieprozesse von fossilen Brennstoffen auf direkte Nutzung erneuerbaren Stromes auch durch die Umstellung auf regenerativ erzeugte Brennstoffe mittels PtG/PtL ein Mehrbedarf an erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen entsteht. Im GreenEe-Szenario wird unterstellt, dass durch die Bereitstellung von Wasserstoff für industrielle Anwendungen ein zusätzlicher Strombedarf für die Wasserelektrolyse in Höhe von rund 130 TWh besteht.

Die energiebedingten Treibhausgasemissionen sinken durch die Umstellung der Energieversorgung bis 2050 auf Null. Die prozessbedingten Emissionen nehmen kontinuierlich bis zum Jahr 2030 um etwa 50%, bis 2040 um 67% gegenüber 1990 ab. Im Jahr 2050 betragen die prozessbedingten Emissionen

nur noch rund 16,2 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq was einer Minderung gegenüber 1990 um etwa 83% entspricht. Die Hauptemittenten der verbleibenden prozessbedingten Emissionen sind die Zement-, die Kalk- und die Glasindustrie.

### 2.7 Landwirtschaft & LULUCF

Die zweitgrößte Treibhausgasemissionsquelle nach dem Energiesektor ist in Deutschland die Landwirtschaft. Vor allem Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden<sup>16</sup> und der Fermentation bei der Verdauung von Wiederkäuern sind hoch und änderten sich in den letzten zehn Jahren nur geringfügig. Weitere wesentliche Emissionen entstehen bei

16 Direkte und indirekte Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden resultieren v. a. aus der Ausbringung von Mineral- und Wirtschaftsdünger (einschließlich Gärreste).



Tab. 2.4

**Übersicht zur Emissionsentwicklung im Bereich Landwirtschaft (CO<sub>2</sub>-Äq)\***

| Landwirtschaft                          | 1990       | 2010       | bis 2030      | bis 2040      | bis 2050      |
|---|------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| Böden                                   | 27.983.280 | 24.050.979 | 21.134.364    | 19.451.408    | 17.756.203    |
| Verdauung                               | 34.651.920 | 24.645.469 | 20.811.250    | 15.307.853    | 9.804.455     |
| Wirtschaftsdüngermanagement             | 13.158.300 | 10.274.520 | 6.250.577     | 3.359.778     | 1.534.148     |
| Kalkung                                 | 1.424.790  | 1.698.047  | 1.500.000     | 1.500.000     | 1.500.000     |
| Harnstoffausbringung                    | 479.600    | 587.408    | 639.027       | 664.836       | 690.645       |
| Sonstiges (Gärreste aus NaWa-Ro-Biogas) | 390        | 1.052.329  | 181.703       | 0             | 0             |
| Summe                                   | 77.698.290 | 62.308.753 | 50.516.921    | 40.283.875    | 31.285.451    |
| Veränderung ggü. 1990                   |            |            | <b>-35,0%</b> | <b>-48,2%</b> | <b>-59,7%</b> |

\* Die Daten für 1990 und 2010 entstammen der nationalen Emissionsberichterstattung 2016.

Quelle: Modellberechnungen

der Lagerung von Wirtschaftsdünger und Gärresten, bei der Kalkdüngung und Anwendung von Harnstoff.

Treibhausgasminderungen können im Bereich Landwirtschaft nur zu einem bestimmten Teil durch technische Maßnahmen erzielt werden. Um bis 2050 die notwendige Minderung von mindestens 50 % zu erreichen, sind zusätzlich geänderte Produktionssysteme und vor allem ein Abbau der Tierbestände notwendig. Um Verlagerungseffekte in andere Länder zu vermeiden, muss parallel der Konsum tierischer Produkte, v. a. Fleisch, auf ein Maß reduziert wird, das einer gesunden Ernährung entspricht<sup>17</sup>.

Die Emissionsentwicklung im GreenEe-Szenario (Tabelle 2.4) resultiert somit aus Annahmen zu technischen, strukturellen sowie gesellschaftlichen Änderungen und basiert im Wesentlichen auf der UBA-Studie (UBA 2014a)<sup>18</sup>. Vor dem Hintergrund veränderter Methoden bei der nationalen Berichterstattung wurden jedoch bei der Ableitung des Transformationspfades hin zu dem dargestellten Zielszenario „ÖKO-20 %“<sup>19</sup> Vereinfachungen vorgenommen.

Bis 2030 können die Tierbestände lediglich in geringem Umfang verkleinert werden. Danach wird, auch aufgrund geänderter Ernährungsgewohnheiten, ein kontinuierlicher Rückgang der Tierbestände bis 2050 realisiert<sup>20</sup>. Durch die Abnahme der Tierbestände entstehen weniger Emissionen aus der Verdauung von Wiederkäuern sowie aus geringeren Mengen an anfallendem Wirtschaftsdünger. Zur Reduktion der Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement trägt auch bei, dass ab 2030 alle Gärrestlager abgedeckt sind und bis 2050 alle erfassbaren Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen vergoren werden. Aufgrund von Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen und negativen Umweltwirkungen (vgl. UBA 2013) werden im GreenEe-Szenario ab 2030 keine Energiepflanzen mehr in Biogasanlagen eingesetzt, sodass die dadurch entstehenden Emissionen schnell zurückgehen.

Trotz einer leichten Zunahme der Harnstoffausbringung und damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>21</sup>, wird durch einen reduzierten Mineraldüngereinsatz und eine gesteigerte Stickstoffeffizienz der Stickstoff-Gesamtüberschuss auf maximal 50 kg N pro ha bis 2030 gesenkt, wodurch vor allem direkte und indirekte N<sub>2</sub>O-Emissionen verringert werden. Eine

17 Entsprechend der Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V.

18 Die Ausführungen basieren auf dem Sachverständigen Gutachten des Thünen-Instituts für das Umweltbundesamt (Osterburg, Kätsch und Wolff 2013b).

19 Es wird eine Ausdehnung des ökologischen Landbaus auf 20 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche bis 2050 angenommen.

20 Bis zum Jahr 2050 keine Mutterkühe, Bullen- und Färsenmast, Schafe minus 50 %, im konventionellen Landbau zusätzlich Milchkuhbestand minus 38 %, Schweinebestand minus 11 % (UBA 2014a).

21 Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Harnstoffausbringung wurden in der UBA-Studie noch nicht berücksichtigt (UBA 2014a).



weitere Treibhausgasreduzierung erfolgt durch die verringerte Düngemittelproduktion<sup>22</sup>.

Es wird angenommen, dass weiterhin Kalk auf landwirtschaftlichen Flächen sowie im Forstbereich angewendet wird, um den pH-Wert der Böden zu stabilisieren und die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Aus der Kalkung entstehen jährlich Emissionen in Höhe von ca. 1,5 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Insgesamt werden die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft in dem Szenario um mehr als die Hälfte gegenüber 1990 gesenkt. Während bis 2030 eine Minderung von 35 % erreicht wird, beträgt sie 2040 bereits rund 50 %.

Durch landwirtschaftlich verursachte Landnutzungsänderungen, wie die Entwässerung von Moorböden oder den Umbruch von Grünland, entstehen zusätzliche Emissionen, die aber nicht der Landwirtschaft, sondern gemäß der Klimaberichterstattung der Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) zugerechnet werden. In der Kategorie LULUCF werden alle anthropogen verursachten Emissionen und Senken von Treibhausgasen mit Landbezug behandelt – neben Ackerland auch Wald, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungsflächen und sonstige Flächen.

Die bisherige Emissionsentwicklung ist von einer fortwährend abnehmenden Netto-Kohlenstoffspeicherung im Wald sowie von hohen Emissionen der organischen Böden des Acker- und Grünlands geprägt. Wegen der weiterhin hohen Kohlenstoff-

senke des Waldes von rund -58 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq in 2010, ist LULUCF insgesamt netto noch eine Kohlenstoffsenke (UBA 2016e).

Ohne weitere Maßnahmen ist allerdings zu erwarten, dass die Netto-Kohlenstoffeinspeicherung im Wald stark nachlässt (oder sogar so viel Kohlenstoff freigesetzt wird, dass der Wald zur Emissionsquelle wird) (Bundesregierung 2017g) und die Emissionen der anderen Landnutzungsaktivitäten ähnlich hoch bleiben. Die wirksamsten Klimaschutzmaßnahmen sind deswegen diejenigen, die Moorböden restaurieren und Waldbiomasse weiter anreichern.

Rund 5 Prozent der in Deutschland landwirtschaftlich genutzten Fläche findet auf trockengelegten Mooren statt (UBA 2016e). Als wirksame Klimaschutzmaßnahme wird entsprechend davon ausgegangen, dass 5 Prozent dieser Fläche jährlich ab 2020 restauriert werden, mit dem Ziel, 2050 lediglich circa 180.000 ha siedlungs- und infrastrukturnahe ehemalige Moorflächen zu nutzen. Hierdurch sinken die Treibhausgasemissionen ab 2040 auf 4 Mio. t. Die daraus entstehenden erheblichen Einschränkungen für die landwirtschaftliche Produktion werden durch eine Abnahme der Tierbestände berücksichtigt.

Um Moore entsprechend zu renaturieren und zu erhalten, werden bis 2050 Torfprodukte schrittweise vollständig durch alternative Substrate ersetzt und damit der Torfabbau gestoppt.

Um den weiteren Druck auf die land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen zu minimieren, sinkt die Flächenneuanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr schrittweise auf etwa 20 ha pro Tag in 2030 und sinkt bis 2050 netto auf 0 ha. Die bereits

<sup>22</sup> Die daraus resultierenden Emissionen werden der chemischen Industrie zugerechnet.

Tab. 2.5

**Übersicht zur Emissionsentwicklung im Bereich LULUCF (CO<sub>2</sub>Äq)**

| LULUCF   | 1990        | 2010        | bis 2030          | bis 2040           | bis 2050           |
|--|-------------|-------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Acker und Grünland<br>(Wiedervernässung Moorböden) | 39.054.000  | 38.088.000  | 19.044.000        | 4.000.000          | 4.000.000          |
| Torfabbau  | 4.128.000   | 4.074.000   | 1.019             | 0                  | 0                  |
| Siedlungsfläche                                    | 1.886.000   | 3.267.000   | 3.011.333         | 2.840.889          | 2.500.000          |
| Summe ohne Wald                                    | 45.068.000  | 45.429.000  | 22.056.352        | 6.840.889          | 6.500.000          |
| Veränderung ggü. 1990                              |             | 0,8%        | -53,5%            | -83,7%             | -85,6%             |
| Wald*  | -75.288.000 | -57.995.000 | -32.000.000       | -30.000.000        | -35.000.000        |
| Holzprodukte (HWP)                                 | -1.330.000  | -4.066.000  | 2.500.000         | 2.000.000          | 2.500.000          |
| Summe mit Wald & HWP                               | -31.550.000 | -16.632.000 | <b>-7.443.648</b> | <b>-21.159.111</b> | <b>-26.000.000</b> |

\* Wald- und HWP-Werte abgeleitet von WEHAM-Ergebnissen dargestellt in (Rüter, Stürmer und Dunger 2017c).

Quelle: Modellberechnungen

umgewandelten Flächen auf organischen Böden emittieren in 2050 weiterhin 2,5 Mio. t CO<sub>2</sub>Äq.

Die Annahmen zum Erhalt des Waldes als Netto-Kohlenstoffsенke orientieren sich im Wesentlichen an dem aktuellen „Naturschutzszenario“ des Modells für Waldentwicklung und Holzaufkommen (WEHAM)<sup>23</sup>. Entsprechend verlängern sich insbesondere die Umrtriebszeiten in Laubholzmischbeständen und die ungenutzte Waldfläche wird von 4,2 %<sup>24</sup> 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. Aufgrund des Verbots bestimmter Holzschutzmittel im Außenbereich wird jedoch angenommen, dass einige Holzverwendungen im Außenbereich durch andere Materialien substituiert werden (bspw. bei Masten, Eisenbahnschwellen, etc.). Ferner wird die direkte energetische Nutzung von Holz durch eine verstärkte Kaskadennutzung weitgehend reduziert. Die energetische Nutzung von Waldrestholz sinkt bis 2050 auf

Null. Hierdurch steht dem verringerten Holzaufkommen auch ein verringerter Holzbedarf entgegen<sup>25</sup>.

Tabelle 2.5 stellt die Entwicklung der LULUCF-Emissionen bis 2050 in Tonnen CO<sub>2</sub>Äq dar. Die Summe ohne Wald wird separat dargestellt, um den Abbau der Emissionen ohne Kohlenstoffsенke sowie die Sockelemissionen hervorzuheben. Insgesamt können die Emissionen um mehr als 85 % gegenüber 1990 reduziert und gleichzeitig der Wald als relevante Kohlenstoffsенke erhalten werden.

Neben ihrem jeweiligen Beitrag zum Klimaschutz tragen die beschriebenen Maßnahmen in den Bereichen Landwirtschaft und LULUCF auch erheblich zur Ressourcenschonung bei. Zu nennen sind hier insbesondere einerseits der abnehmende Bedarf der landwirtschaftlichen Produktion in Bezug auf Fläche, Nährstoffen, Wasser und Biomasse (v. a. durch Reduktion des Futtermittelbedarfs und Einstellung der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse) und andererseits die positiven Effekte der reduzierten Nährstoffüberschüsse auf die Schutzgüter Wasser, Luft und Boden sowie Biodiversität.

23 Durchschnittswerte nach (Rüter, Stürmer und Dunger 2017c).

24 Formal geschützte und sonstige ungenutzte Waldflächen.

25 Die starke Abnahme der energetischen Nutzung von Holz und deren Wirkung auf den Holzbedarf konnten in dieser Studie nur qualitativ betrachtet werden. Es kann keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob ein reduziertes Holzaufkommen gänzlich ausgeglichen werden kann oder ob sich dieses möglicherweise auf das Einfuhr-Ausfuhr-Verhältnis auswirkt.



## 2.8 Abfall & Abwasser

Im Abfallsektor konnte bereits durch verschiedene Maßnahmen ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung geleistet werden. Seit den frühen 1990er Jahren wurde in Deutschland die Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle durch die getrennte Erfassung verwertbarer Abfallbestandteile und den Ausbau von Kapazitäten zur Behandlung von Restabfällen weitgehend reduziert. Weiterhin wird seitdem das Deponiegas gefasst und behandelt. Seit 2005 ist die Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle nicht mehr zulässig, sodass die nach diesem Zeitpunkt abgelagerten Abfälle praktisch nicht mehr zur Deponiegasbildung<sup>26</sup> beitragen.

Sofern möglich, erfolgt eine energetische Nutzung des Deponiegases. Eine vollständige Gasfassung ist aus technischen Gründen jedoch nicht möglich. Der rückläufige Trend der Methanemissionen aus Deponien wird sich weiter fortsetzen und mit dem voranschreitenden biologischen Abbau der organischen Bestandteile im Deponiekörper weiter abnehmen. Bis zum vollständigen Abklingen der Methanbildung werden jedoch noch mehrere Jahrzehnte aktive Maßnahmen zur Emissionsminderung erforderlich sein. Durch Deponierückbau und aerobe Stabilisierungsverfahren (Deponiebelüftung) wird die rückläufige Entwicklung der Methanemissionen der Deponien beschleunigt.

In mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) wurden 2010 in Deutschland ca. 5 Mio. t Restsiedlungsabfälle behandelt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Behandlungsmengen bis 2050 konstant bleiben. Bereits heute ist ein Trend zur Umrüstungen der MBA zu mechanisch-biologischen Stabilisierungsanlagen (MBS) erkennbar. Prozessbedingt sind die Abgasmengen und die Bildung von Methan und Lachgas im biologischen Behandlungsprozess bei der MBS deutlich geringer als bei klassischen mechanisch-biologischen Verfahren. Im Szenario wird ab 2020 eine kontinuierliche Umrüstung unterstellt, so dass 2050 ausschließlich MBS-Anlagen betrieben werden und sich dementsprechend die Treibhausgasemissionen aus dem Sektor MBA bis 2050 kontinuierlich verringern.

Der Anteil der fossilen Treibhausgasemissionen bei der energetischen Verwertung von Abfallströmen

wird bis 2050 nahezu vollständig reduziert. Vor dem Hintergrund zunehmender Recyclingraten ist dementsprechend für den Transformationspfad die Wechselwirkung zu der Produktion dieser langlebigen Stoffkomponenten in den Industriebereichen und damit die hinreichende frühzeitige Bereitstellung treibhausgasneutraler Rohstoffe zu berücksichtigen (siehe Kapitel 2.3).

Im Jahr 2010 wurden in Deutschland etwa 13 Mio. t Bioabfälle behandelt und verwertet. Etwa zwei Drittel dieser Menge wurden kompostiert und ein Drittel in Bioabfallvergärungsanlagen behandelt. Während der Behandlung entstehen insbesondere Methan- und Lachgasemissionen. Die geltende verpflichtende Getrenntsammlung von Bioabfällen wird im Szenario fortgeführt und gleichzeitig wird ab 2020 angenommen, dass es zu einer Erhöhung des Anteils der Bioabfallvergärung bei gleichzeitigem Rückgang des Anteils der Kompostierung kommen wird. Eine kontinuierliche Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 wird durch eine fortschreitende Weiterentwicklung und eine sukzessive Anpassung des Anlagenbestandes an den Stand der Technik erzielt. Wichtige Maßnahmen sind die Reduzierung der Methanbildung durch eine aktive Belüftung von Rotteprozessen sowie eine konsequentere Erfassung von Biogas und Vermeidung von Leckagen. Die Bildung von Lachgas kann insbesondere durch eine gezielte Abscheidung von Ammoniak in der erfassten Abluft reduziert werden.

Die Abwasserentsorgung in Deutschland ist bereits heute sehr fortschrittlich und erfüllt die europäischen Anforderungen der Kommunalabwasserrichtlinie hinsichtlich der Anschlussgrade und Reinigungsverfahren ausnahmslos. Die kontinuierliche Verbesserung der Abwasserentsorgung, die Steigerung des Anschlussgrades an die öffentliche Abwasserinfrastruktur und der zu erwartende Bevölkerungsrückgang im ländlichen Raum werden darüber hinaus die Zahl der abflusslosen Gruben bis 2050 weiter reduzieren und somit einen Beitrag zur Einsparung von Emissionen liefern.

In Kläranlagen wird die Ressource Abwasser energetisch durch die Verbrennung von Klärgas in betriebseigenen Blockheizkraftwerken genutzt. Der erzeugte Strom wird derzeit vorrangig betriebsintern verbraucht und deckt zwischen 30 % und 70 % des Eigenstrombedarfs, der für die Behandlung des

<sup>26</sup> In Deponien entsteht beim biologischen Abbau der organischen Anteile unter Luftabschluss Deponiegas, das 50–60 % Methan enthalten kann.

Abwassers notwendig ist. Der Wärmebedarf der Anlagen (Faulbehälter, Betriebsräume) wird in der Regel komplett gedeckt. Weiterhin kann eine erhöhte Gasproduktion durch effizientere Technologien, Verfahrensoptimierungen und zusätzliche Anlagen, die ihre Behandlung auf anaerobe Verfahren umstellen, erreicht werden (Haberkern, et al. 2008a). Die Flexibilisierungsoptionen beinhalten neben lokalen Wärmekonzepten und einer flexiblen Stromerzeugung auch die Aufwertung und Einspeisung des Klärgases ins Gasnetz und der damit einhergehenden Substitution fossiler Ressourcen. Abwasserentsorger können dementsprechend mit zwei Maßnahmen einen sinnvollen Beitrag zur Treibhausgasreduzierung leisten. Einerseits kann der Nettostromverbrauch durch eine gesteigerte Gasproduktion und reduzierte Energieverbräuche reduziert werden, andererseits kann eine Flexibilisierung der Kläranlagen dabei helfen, Ressourcen zu schonen und Treibhausgase einzusparen. Im GreenEe-Szenario, wird davon ausgegangen dass hälftig eine Einspeisung ins Gasnetz und Nutzung vor Ort in Blockheizkraftwerken erfolgt.

Zu den kaum zu beeinflussenden Emissionen gehören die Emissionen, die durch die Abwasserbehandlung entstehen. Diese korrelieren sowohl mit den Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung als auch der damit verbundenen Landwirtschaft und Viehzucht. Durch Veränderungen in diesen beiden Bereichen ergeben sich noch kaum absehbare Änderungen, die die Emissionen der Kläranlagen weiter reduzieren können.



Tab. 2.6

**Treibhausgasentwicklung im Bereich Abfall und Abwasser (CO<sub>2</sub>-Äq)**

|                                     | bis 2010   | bis 2030  | bis 2040  | bis 2050  |
|-------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Deponie</b>                      |            | 3.083.333 | 1.483.333 | 700.000   |
| <b>MBA</b>                          |            | 136.300   | 123.167   | 96.900    |
| <b>Kompostierung/<br/>Vergärung</b> |            | 779.974   | 708.736   | 566.260   |
| <b>abflusslose Gruben</b>           |            | 70.208    | 60.847    | 42.125    |
| <b>Kläranlagen</b>                  |            | 1.975.248 | 1.815.987 | 1.497.465 |
| <b>Summe</b>                        | 13.677.254 | 6.045.064 | 4.192.070 | 2.902.750 |
| <b>Veränderung ggü.<br/>1990</b>    | -62,3 %    | -84,07 %  | -88,96 %  | -92,35 %  |

Quelle: Modellberechnungen









# 3

**Ein Weg zum  
treibhausgasneutralen und  
ressourcenschonenden  
Deutschland – Wirkungen**





### 3.1 Wirkung auf Treibhausgasemissionen

Der Klimawandel und seine Folgen sind bereits heute spürbar (UBA 2017k). Es bedarf daher rascher und ambitionierter Klimaschutzmaßnahmen, um die globale Erwärmung zu begrenzen. Bereits 2010 hat die Bundesregierung mit dem langfristigen Ziel einer Treibhausgasminderung gegenüber 1990 um mindestens 80 bis 95 % den historisch notwendigen Beitrag von Deutschland erklärt. Im Jahr 2015 haben sich die Vertragsparteien der Klimarahmenkonvention im Übereinkommen von Paris auf das gemeinsame Ziel verständigt, die Erderwärmung deutlich unter 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu halten sowie Anstrengungen zu unternehmen, um den Temperaturanstieg auf 1,5°C zu begrenzen. Auch vor diesem Hintergrund hat die Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050 mit sektoralen Zielen für 2030 und einer Minderung über alle Emissionsquellen hinweg um 55 % bis 2030 gegenüber 1990 beschlossen.

Aus Sicht des UBA sollte, um die Folgen des Klimawandels für Mensch und Umwelt beherrschbar zu gestalten, eine schnelle und ambitionierte Klimaschutzpolitik erfolgen, mit dem Ziel einer Treibhausgasminderung von 95 % bis 2050. Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass eine Begrenzung des Temperaturanstiegs mit höherer Wahrscheinlichkeit erreicht werden kann, wenn früher und ambitionierter Minderungen umgesetzt werden. Bei verzögerter Klimapolitik steigen zudem die Kosten und die Abhängigkeit von risikobehafteten Technologien wie Atomenergie oder CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung (CCS), welche aus Sicht des UBA nicht Bestandteil eines nachhaltigen Energiesystems darstellen. (Clarke, et al. 2014e).

Vor diesem Hintergrund wird – wie bereits in der UBA-Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (UBA 2014a) – im vorgestellten GreenEe-Szenario bis 2050 eine Treibhausgasminderung um 95 % gegenüber 1990 dargestellt. Der Transformationsweg dorthin wird über die verbleibenden Dekaden durch stetige ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen und dafür notwendige begleitende Forschung und Entwicklung realisiert. Dementsprechend erfolgt bereits bis 2030 eine Treibhausgasgesamt-minderung über alle Sektoren um 60 % und bis 2040 um 80 % gegenüber 1990.

Die Minderung im Bereich der energiebedingten Treibhausgasemissionen muss insbesondere bis 2030, aber auch in der Dekade bis 2040 einen überproportionalen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Ein erheblicher Beitrag wird durch die Veränderungen im Kraftwerkspark geleistet. Neben der reinen Substitution der fossilen Energieversorgung muss der Ausbau der erneuerbaren Energien auch bereits der zunehmenden Integration von Sektorkopplungstechniken wie PtH mit Wärmepumpen und Elektromobilität gerecht werden. Vor diesem Hintergrund ist bereits bis 2030 eine wesentliche Erhöhung der Ausbaukorridore der erneuerbaren Energien notwendig. Auch die Steigerung der Energieeffizienz und Hebung von Einsparpotenzialen über alle Energieanwendungen im Bereich Industrie und Verkehr hinweg, aber insbesondere im Bereich der Raumwärmeversorgung, tragen wesentlich zu den Treibhausgaseinsparungen im Energiebereich bis 2030 bei. In der anschließenden Dekade erfolgt der vollständige Verzicht auf kohlebasierte Energieversorgung bis hin zur vollständigen regenerativen Energieversorgung im Jahr 2050 (siehe Kapitel 2.3).

Durch die erheblichen Minderungen in den anderen energiebedingten Anwendungen, also Energiewirtschaft, Gebäude und Industrie, können die geringeren Treibhausgas-minderungen im Verkehr bis 2030 überkompensiert werden. Der Verkehrsbereich (ohne internationalem See- und Flugverkehr) bleibt in diesem Szenario mit einer Minderung bis 2030 um rund 30 % gegenüber 1990 hinter den sektoralen Zielen der Bundesregierung im Klimaschutzplan (BMUB 2016f) zurück (siehe Tabelle 3.1). Die energiebedingten Emissionsminderungen ohne Verkehr liegen für das Jahr 2030 über den Zielen der Bundesregierung im Klimaschutzplan. Diese Treibhausgase reduzieren sich um rund 68 % bis 2030 und um rund 88 % bis 2040 gegenüber 1990. Auch im Bereich Landwirtschaft kann bis 2030 eine erhebliche Minderung erreicht werden, so dass mit einer Minderung um 35 % gegenüber 1990 das sektorale Ziel des Klimaschutzplanes leicht übererfüllt wird.

Abweichend zum Klimaschutzplan werden die Treibhausgasemissionen im Bereich LULUCF mit betrachtet. Bis 2030 werden hier die Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um 49 % reduziert. In der Dekade bis 2040 leisten die im Kapitel 2.7 beschriebenen Ansätze dieser Emissionsquellen-gruppe neben dem Energiebereich einen überproportionalen Beitrag zur Treibhausgas-minderung (weitere 36 % gegenüber 1990).

Tab. 3.1

**Treibhausgasminderung im GreenEe-Szenario<sup>a)</sup> bis 2030 im Vergleich zu den Zielen der Bundesregierung**

|                                | Klimaschutzplan           |            |                     |             | GreenEe-Szenario  |                                   |             |
|--------------------------------|---------------------------|------------|---------------------|-------------|---|-----------------------------------|-------------|
|                                | Emissionsziel 2030        |            | Minderung ggü. 1990 |             | Emissionen 2030   | Minderung ggü. 1990 <sup>b)</sup> |             |
|                                | von                       | bis        |                     |             |   |                                   |             |
|                                | Mio. t CO <sub>2</sub> Äq |            | %                   |             | Mio. t CO <sub>2</sub> Äq                                 | %                                 |             |
| <b>Energie-<br/>wirtschaft</b> | 175                       | 183        | 62 %                | 61 %        | <b>Energie<br/>(ohne Ver-<br/>kehr) und<br/>Industrie</b> | 314                               | 68 %        |
| <b>Industrie</b>               | 140                       | 143        | 51 %                | 49 %        |   |                                   |             |
| <b>Gebäude</b>                 | 70                        | 72         | 67 %                | 66 %        |   |                                   |             |
| <b>Verkehr</b>                 | 95                        | 98         | 42 %                | 40 %        | <b>Verkehr</b>  | 115                               | 30 %        |
| <b>Landwirt-<br/>schaft</b>    | 58                        | 61         | 34 %                | 31 %        | <b>Landwirt-<br/>schaft</b>                               | 51                                | 35 %        |
| <b>Sonstige</b>                | 5                         | 5          | 87 %                | 87 %        | <b>Abfall</b>   | 6                                 | 83 %        |
| <b>Gesamt-<br/>summe</b>       | <b>543</b>                | <b>562</b> | <b>56 %</b>         | <b>55 %</b> |   | <b>486</b>                        | <b>61 %</b> |

a) Angaben ohne LULUCF und internationalen Flug- und Seeverkehr. b) Basis der 1990-Werte ist abweichend zum Klimaschutzplan der Nationalen Inventarbericht 2016 v6.

Quelle: BMUB 2016f und Modellberechnungen

Die gleichfalls mitbetrachteten Emissionen des internationalen Flug- und Seeverkehrs steigen aufgrund des wachsenden Verkehrsaufkommens und des noch geringen Anteils treibhausgasneutraler Kraftstoffe bis 2030 an. In der Dekade bis 2040 sinken diese deutlich und betragen rund 37 % gegenüber 2010. Bis 2050 erfolgt die vollständige Substitution fossiler Kraftstoffe durch erneuerbare Energieträger.

Im Jahr 2040 wird im Szenario bereits der untere Bereich des Zielkorridors der Bundesregierung für 2050, also eine Treibhausgasminderung um 80 % gegenüber 1990, erreicht. Dabei wird immer noch der größte Anteil der Treibhausgasemissionen mit etwa 67 % im Bereich Energie und von den energiebedingten Emissionen etwa 38 % durch den Verkehr verursacht. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass im GreenEe-Szenario unterstellt wird, dass regenerative Kraftstoffe (PtL) erst spät im Transformationsprozess für diesen Anwendungsbereich zur Verfügung stehen und die ambitionierte Marktintegration von Elektromobilität die Emissionen der fossilen Kraftstoffnutzung nicht überkompensieren kann (siehe Kapitel 2.3). Bis in die Dekade nach 2040 hinein werden die

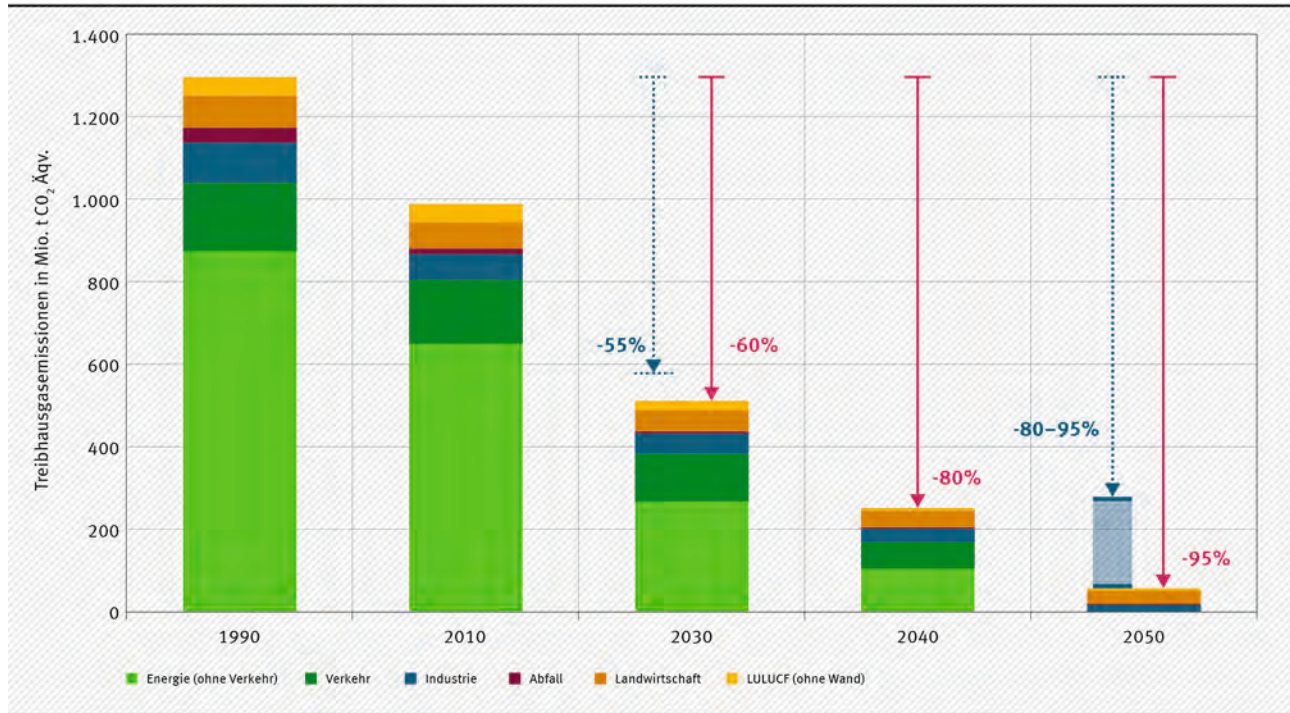
verbleibenden Kraftstoffbedarfe somit teilweise noch fossil gedeckt, bis zur vollständigen Substitution im Jahr 2050. Auch wird bereits die Relevanz der sehr schwer vermeidbaren Emissionen im Bereich der Landwirtschaft deutlich.

Durch vollständige Umstellung der Energieversorgung bis zum Jahr 2050 auf strombasierte erneuerbare Brenn-, Kraft- (inklusive der Bedarfe im internationalen Flug- und Seeverkehr) und Rohstoffe – werden die energiebedingten Emissionen nahezu vollständig vermieden. Bis zum Jahr 2050 erfolgt ebenso die vollständige Umstellung auf neue Prozesstechniken, so dass sich die Emissionen im Bereich Industrie auf die prozesstechnisch unvermeidbaren reduzieren werden. Im Zielpunkt verursachen diese rund 28 % der Gesamtemissionen. Die größte verbleibende Emissionsquelle ist die Landwirtschaft mit knapp 55 % der gesamten Treibhausgasemissionen im Jahr 2050.



Abb. 3.1

**Entwicklung der Treibhausgasemissionen über alle Emissionsquellgruppen<sup>a)</sup> im GreenEe-Szenario im Vergleich zu den Zielen der Bundesregierung<sup>b)</sup>**



a) Ohne internationalen Flug- und Seeverkehr.

b) Die Ziele der Bundesregierung umfassen nicht die Emissionsquellgruppe LULUCF.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

**3.2 Wirkung auf Ressourceninanspruchnahme  
Folgen der Transformation zu THGND für den  
Rohstoffbedarf Deutschlands**

Die Wirkungen der Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland auf die Rohstoffinanspruchnahme sind vielseitig und tiefgreifend und nicht nur auf Deutschland beschränkt. Denn durch die Außenhandelsverflechtung der deutschen Wirtschaft und dem Import vielseitiger Konsumgüter beansprucht Deutschland erhebliche Mengen an Rohstoffen auch im Ausland, die die Menge an in Deutschland gewonnenen Rohstoffen deutlich übersteigt. Im Sinne des Verursacherprinzips sind diese Rohstoffe ebenfalls dem Rohstoffbedarf Deutschlands zuzuordnen. Dies erfolgt, indem den Im- und Exporten jeweils die tatsächlichen Rohstoffbedarfe zur ihrer Produktion hinzugerechnet werden. Hierdurch erhält man Informationen über den Primärrohstoffeinsatz (RMI, Raw Material Input) und, bei Berücksichtigung der Exporte, die Primärrohstoffinanspruchnahme (RMC, Raw Material Consumption) Deutschlands, gemessen in Masseneinheiten.

Die Primärrohstoffinanspruchnahme in Deutschland lag im Bezugsjahr 2010 bei insgesamt 1.370 Mio. t

und wird dominiert durch nicht-metallische Mineralien und fossile Rohstoffe. Es ist somit ein naheliegender Schluss durch eine Reduktion der Nutzung der fossilen Rohstoffe sowohl den Rohstoffbedarf als auch gleichzeitig die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Auch führen viele Ansätze zur Reduktion des Primärrohstoffeinsatzes zu Energieeinsparungen, wie etwa der verstärkte Einsatz von Sekundärrohstoffen oder die Optimierung von Verarbeitungsprozessen zur Vermeidung von Verschnitt.

Andererseits erfordert eine Transformation zur Treibhausgasneutralität, wie in dem vorgestellten Szenario dargestellt, eine weitgehende Umstrukturierung des Energiesystems, erhebliche Veränderungen in den Anwendungstechniken durch zunehmende Nutzung von PtX-Techniken und den Umbau von Infrastrukturen. Dies führt wiederum zumindest zeitweise zu einem erhöhten Rohstoffbedarf zum Aufbau der neuen Infrastrukturen (vor allem Metallen und Baumineralien), die dann im anthropogenen Lager gebunden sind (Hertwich, et al. 2016n). Auf der anderen Seite sinkt durch den Umbau der Bedarf an fossilen Energieträgern und durch den Rückbau von Infrastruktur stehen Rohstoffe aus dem anthropogenen Lager für

ein Recycling zur Verfügung. Dies verdeutlicht auch die im nachfolgenden Kapitel dargestellte systemische Betrachtung einer möglichen globalen Transformation.

Zu den wesentlichen Rohstoffen, die in erneuerbaren Energiesystemen benötigt werden, gehören neben mineralischen Rohstoffen (für Fundament, Gebäude, Glas) und Stahl (für Windenergieanlagen und Strommasten) auch Nichteisenmetalle wie Kupfer und Aluminium (für Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen, Batterien, Stromleitungen, Spulen) sowie Sondermetalle wie Neodym und Dysprosium (Magnete der Generatoren). Diese Rohstoffe stehen dann langfristig dem Wirtschaftskreislauf zur Verfügung, so dass die künftige Inanspruchnahme von Primärrohstoffen deutlich reduziert werden kann. Der Einsparung von fossilen Rohstoffen steht also ein temporärer Mehrbedarf von anderen Rohstoffen gegenüber, die dann im anthropogenen Lager gebunden sind. In welchem Umfang und in welcher Zusammensetzung das anthropogene Lager aufgebaut wird und in welcher Größenordnung Primärrohstoffe eingespart werden können, ist dabei maßgeblich auch von der Wahl der Technologien abhängig (Hertwich, et al. 2016n) (Abbildung 3.2).<sup>1</sup> So weisen bereits heute zugebaute erneuerbare Energieanlagen deutlich niedrigere Rohstoffbedarfe auf als die im Bestand befindlichen Anlagen. Insbesondere bei Eisen sowie Edel- und Halbedelmetallen konnten in den letzten Jahren durch Weiterentwicklungen und Substitution Rohstoffeffizienzpotenziale gehoben werden. Unter Berücksichtigung von Weiterentwicklungen über die heute bestverfügbare Technik hinaus, kann eine Reduzierung der Rohstoffbedarfe im Verhältnis zur installierten Lebensleistung<sup>2</sup> bei Wind onshore um etwa 60%, bei Photovoltaik um etwa 80% erwartet werden (Wiesen, et al. 2017l).



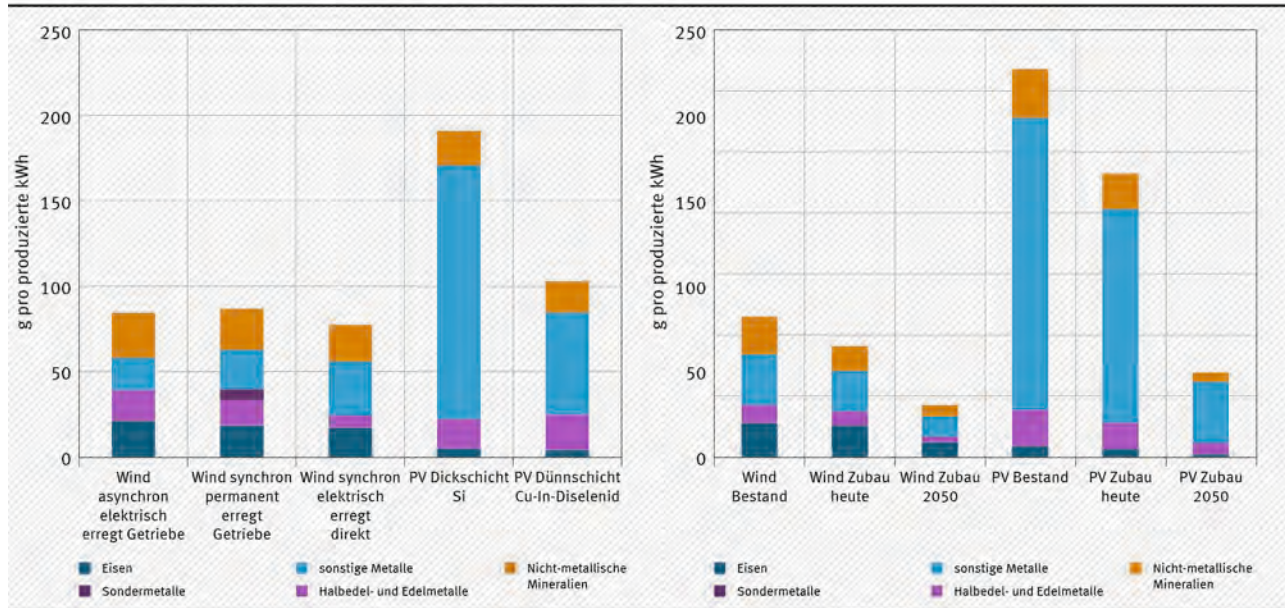
1 So kann beispielsweise bei Windenergieanlagen je nach Generatortyp der Bedarf an Seltenerd-Metallen und Halbedelmetallen stark variieren oder je nach Zellentyp der Bedarf an Edelmetallen für Photovoltaik deutlich unterschiedlich sein (Wiesen, et al. 2017l).

2 Mit der Weiterentwicklung der Technik ist davon auszugehen, dass sowohl die Lebensdauer der Anlage als auch die Effizienz und Leistung der Anlage zu steigern ist.



Abb. 3.2

**Ausgewählte Rohstoffnutzung einiger Energieerzeugungsanlagen nach heutigem Stand (links)<sup>a)</sup> und in der Entwicklung (rechts)<sup>b)</sup> basierend auf (Wiesen, et al. 2017)**



a) Die Unterscheidung der Windenergieanlagen an Land erfolgt hinsichtlich des jeweiligen Generatortyps. Es wird unterschieden (a) ein Asynchron-Generator (Rotor „eilt“ dem Magnetfeld voraus) mit hoch übersetzendem Getriebe und elektrisch erregt (Anlagenbeispiel GAMESA G90), (b) ein Synchrongenerator (Rotor dreht sich synchron mit dem Magnetfeld), welcher permanent erregt ist und ein Getriebe verwendet (Anlagenbeispiel VESTAS V112) und (c) ein elektrisch erregter Synchrongenerator mit Direktantrieb (Anlagenbeispiel ENERCON E-82). Bei Photovoltaikanlagen wird zwischen Dickschicht- und Dünnschichtzelltechniken unterschieden. Für Dickschichtzellen wird eine Anlage mit polykristallinen Silizium Absorbern, bei Dünnschichtzellen ein Absorber aus Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid gewählt. Beide Anlagen sind als Aufdachinstallationen modelliert (Wiesen, et al. 2017).

b) Zur Darstellung der veränderten Rohstoffbedarfe im Laufe der unterstellten technischen Entwicklung wurde vereinfacht jeweils ein Anlagentyp dargestellt. Windenergie an Land wird hier repräsentiert durch eine Anlage mit elektrisch erregtem Synchron-generator mit Direktantrieb dargestellt, da dieser Anlagentyp den aktuellen Markt in Deutschland dominiert. Die technische Entwicklung wird mit der Variation der Parameter Nennleistung, Volllaststunden, Rotordurchmesser und Nabenhöhe abgebildet. Bei Photovoltaik basiert die Modellierung auf einer Dickschichtzellen-Anlagen mit Absorber aus polykristallinem Silizium ausgelegt mit 3 kWp. Es erfolgt eine Variation hinsichtlich Lebensdauer, Schichtdicke, Wirkungsgrad und Volllaststunden (Wiesen, et al. 2017).

Quelle: eigene Darstellung nach Wiesen, et al. 2017

Es gilt somit die Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland möglichst ressourcenschonend und rohstoffsparend zu gestalten, indem ambitionierte Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Kreislaufführung entwickelt und umgesetzt werden.

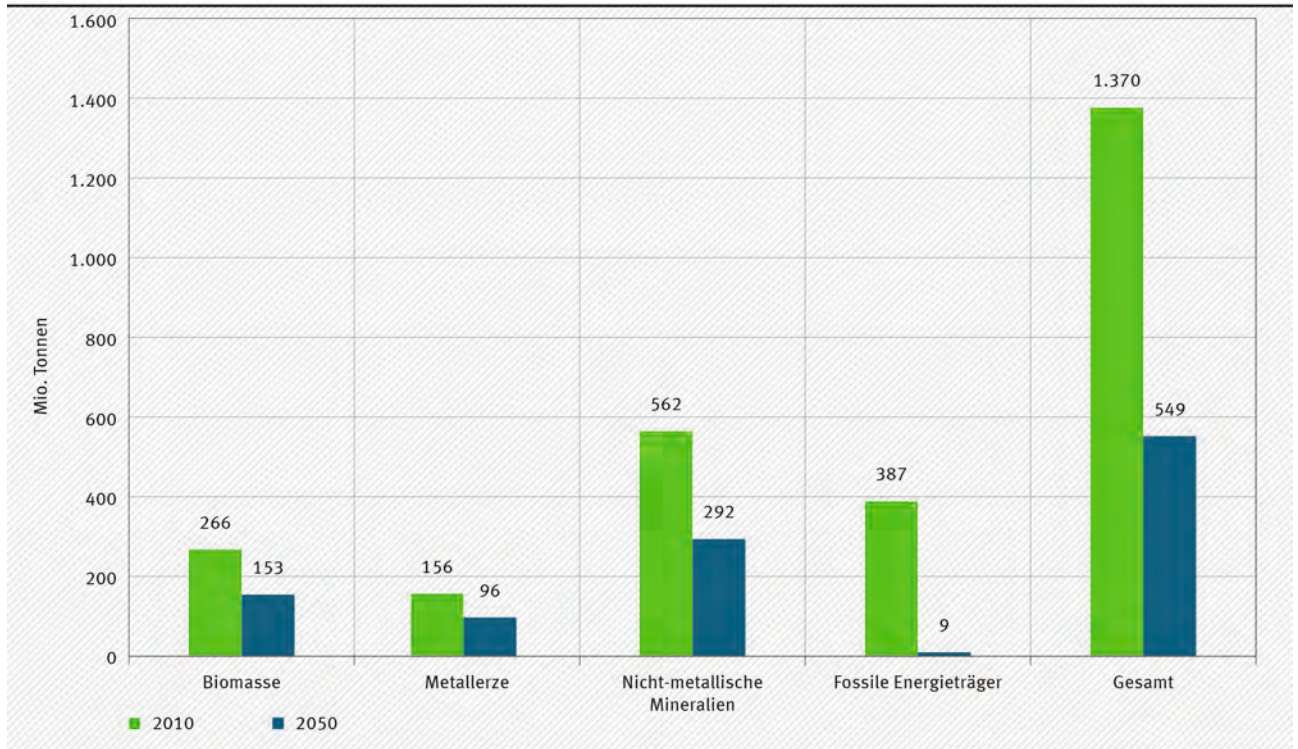
Aufgrund der durch die Bundesregierung vorgesehenen ambitionierten Fortentwicklung des deutschen Ressourceneffizienzprogrammes (BMUB 2012b) und unter Berücksichtigung des allgemeinen technischen Fortschritts, kann mindestens der Trend der letzten Jahre hinsichtlich der Entwicklung der Rohstoffeffizienz von 1,1 % jährlich bis 2050 fortgeschrieben werden. Zusätzlich konnten auf Basis einer umfangreichen Literaturstudie weitere spezifische und differenziertere Effizienzpotenziale sowie Potenziale zum Einsatz von Sekundärrohstoffen und Materialsubstitutionen, die ebenfalls zur Reduzierung der Primärrohstoffentnahme beitragen, ermittelt werden – so zum Beispiel für die metallverarbeitende Industrie, die chemische Industrie oder den Bausektor.

Auch in Europa wird zunehmend eine Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Implementierung entsprechender Politiken und Ziele angestrebt (EEA 2016g). Es ist davon auszugehen, dass dies ambitioniert fortgeführt wird, da auch international die Bedeutung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen und die Steigerung der Ressourceneffizienz an Bedeutung gewinnen. So greifen die Agenda 2030 der Vereinten Nationen, die Beschlüsse der G7 von Elmau und Toyama (BMUB 2016h) sowie der Beschluss der G20 von Hamburg (G20 Germany 2017 2017m) die Steigerung der Ressourceneffizienz explizit auf. Es ist somit davon auszugehen, dass das europäische und außereuropäische Ausland hinsichtlich der technologischen Entwicklung und der Steigerung der Ressourceneffizienz erhebliche Fortschritte erzielen werden. Somit wird im vorgestellten GreenEe-Szenario unterstellt, dass der Stand der technischen Entwicklung in 2050 innerhalb Europa vergleichbar ist. International verringert sich der Abstand deutlich, so dass global der Stand der



Abb. 3.3

### Rohstoffanspruchnahme nach Rohstoffarten, Vergleich 2010 und 2050 im GreenEe-Szenario, Berechnung in Rohstoffäquivalenten (RME)



Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

technischen Entwicklung in 2050 dem Deutschlands des Jahres 2040 entspricht.

Insgesamt zeigt die erwartete Primärrohstoffanspruchnahme in 2050 des GreenEe-Szenarios, dass die Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestaltet werden kann. Die Primärrohstoffanspruchnahme (RMC) sinkt absolut von 1.370 Mio. t in 2010 um knapp 60 % auf 549 Mio. t in 2050 (Abbildung 3.3). Die Reduktion pro Person fällt aufgrund der erwarteten Bevölkerungsentwicklung mit 55 % geringfügig niedriger aus (Abbildung 3.4).

Erwartungsgemäß sinkt die Inanspruchnahme fossiler Rohstoffe absolut und prozentual am stärksten, von 387 Mio. t in 2010 auf 9 Mio. t in 2050 (ca. -98%). Dabei sind die verbleibenden Mengen fossiler Energieträger auf die Produktion importierter Güter im außereuropäischen Ausland zurückzuführen, da hier eine unvollständige Umstellung des Energiesystems und der Produktionstechniken auf erneuerbare Energiequellen bzw. Rohstoffe angenommen wurde. In Deutschland ist der Rückgang der Nutzung fossiler Energieträger bis 2030 im Wesentlichen auf einen Rückgang der Kohleverstromung zurückzuführen.

Ab 2030 erfolgt zusätzlich ein verstärkter Rückgang der Nutzung von Öl und Gas, da strombasierte Technologien für die Wärmeversorgung und im Mobilitätsbereich zunehmend verbreitet sind.

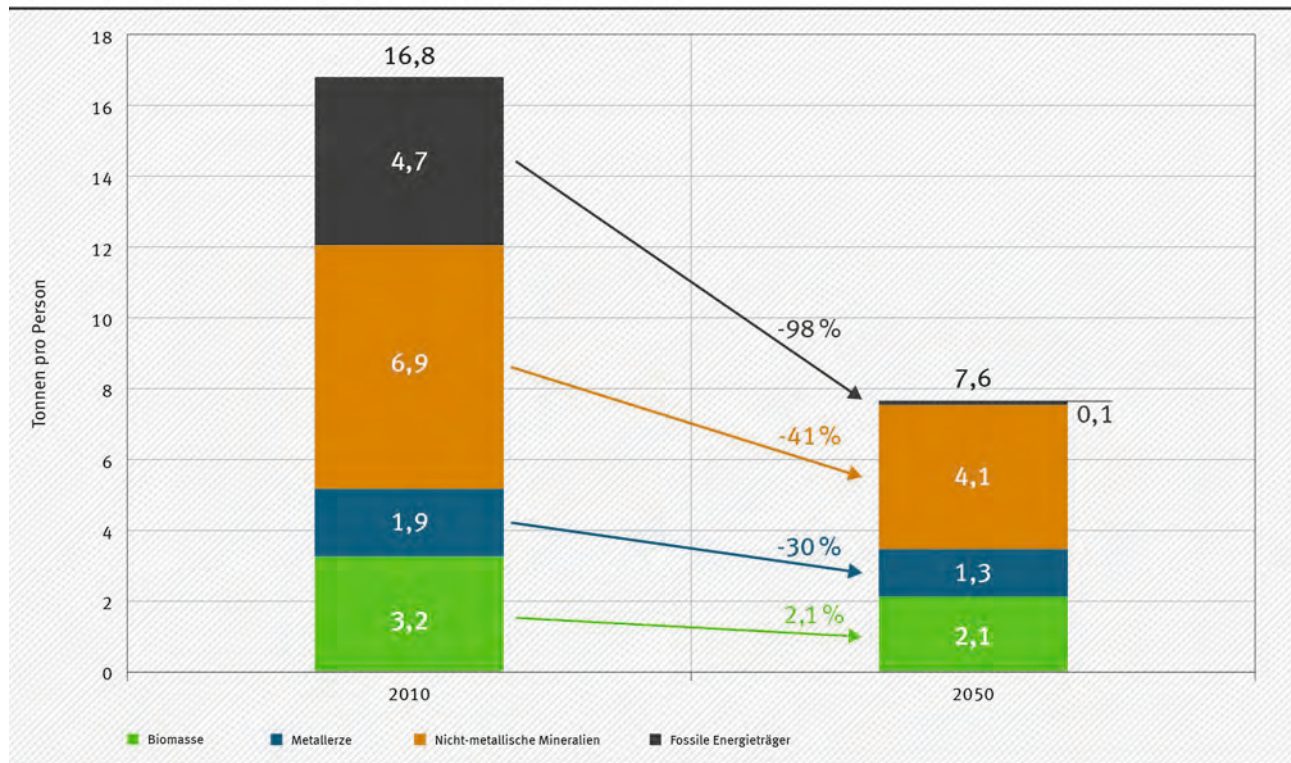
Ein weiterer markanter Rückgang erfolgt bei der Inanspruchnahme von nicht-metallischen Mineralien. Diese halbiert sich nahezu von 562 Mio. t in 2010 auf 292 Mio. t in 2050 (Rückgang um rund 48%). Dominierend sind

- ▶ die deutlich verringerte Nutzung von Baumaterialien aufgrund der dem GreenEe-Szenario zugrundeliegenden verringerten Bautätigkeit (wie keine Netto-Flächeneuversiegelung mit Wirkung auf Hoch- und Tiefbauaktivitäten, überwiegend nur geringer Zubau der Versorgungsinfrastruktur, kein Ausbau der Wasserkraft, keine neuen großen Infrastrukturprojekte wie Flughäfen oder ähnliches),
- ▶ die Erhöhung des Recyclinganteils bei Baustoffen sowie
- ▶ die Verwendung alternativer Baumaterialien und alternativer Bauweisen



Abb. 3.4

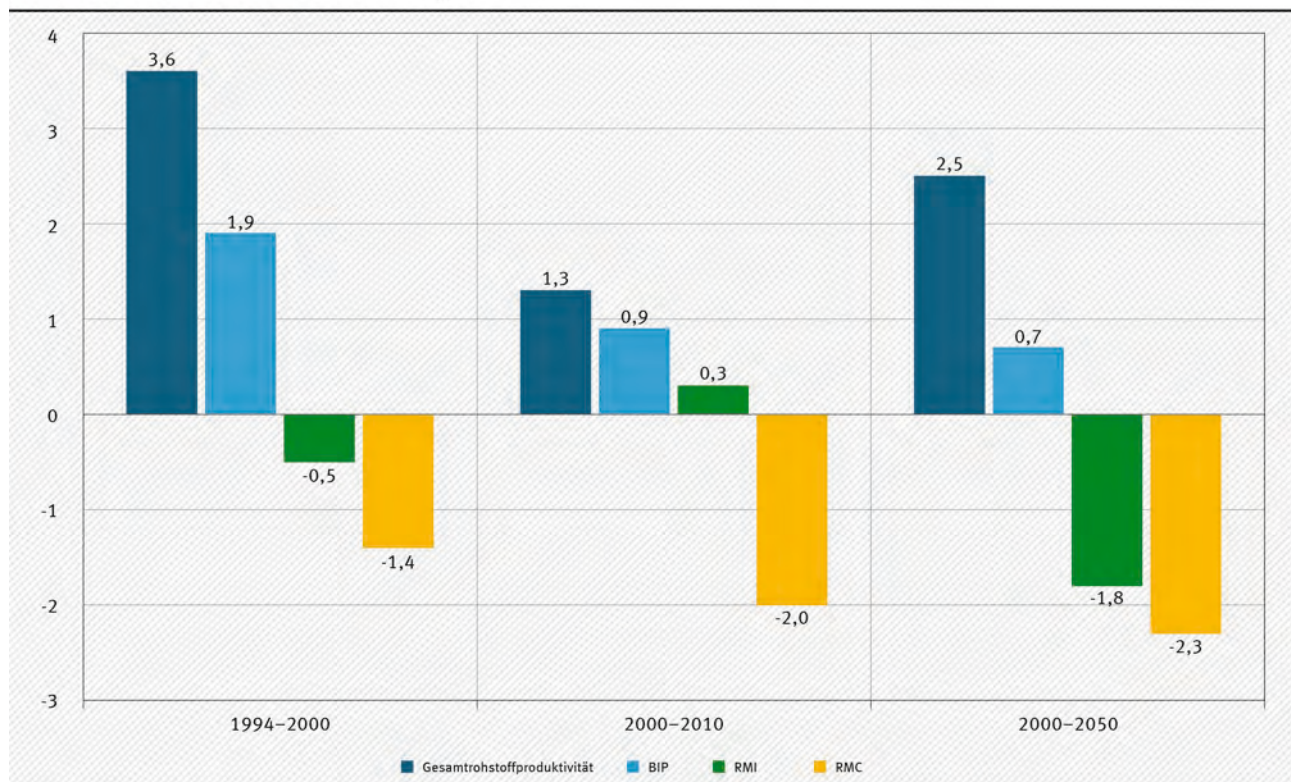
**Rohstoffanspruchnahme pro Person, 2050 gegenüber 2010**



Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen

Abb. 3.5

**Komponenten der Gesamtrohstoffproduktivität und Primärorhstoffanspruchnahme 1994–2050, jahresdurchschnittliche Veränderung in %\***



\* URMOD-Modellrechnung für 2010 und 2050 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2010 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994–2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA). Ab 2016 lineare Interpolation.

Quelle: eigene Darstellung der Modellberechnungen



Auch 2050 bleibt die Inanspruchnahme nicht-metallischer Mineralien, insbesondere der Baumineralien, die massenmäßig dominierende Rohstoffkategorie der Primärrohstoffinanspruchnahme, mit nunmehr 53 % an der gesamten Primärrohstoffnutzung (2010 lag der Anteil bei rund 41 %).

Die im Szenario unterstellte Umstellung der Ernährungsgewohnheiten, insbesondere der reduzierte Fleischkonsum, dominiert den Rückgang der Biomassenutzung von 266 Mio. t in 2010 auf 153 Mio. t in 2050. Alleine der Rückgang der Futtermittel beläuft sich auf schätzungsweise 52 Mio. t inklusive der im Ausland eingesetzten Futtermittel zur Fleischproduktion und deckt somit bereits 46 % des Rückgangs. Auch der Verzicht auf die energetische Nutzung von Anbaubiomasse führt zu einem relevanten Rückgang der Biomassenutzung insgesamt.

Mit rund 39 % erfolgt der geringste Rückgang in der Nutzung der Metallerze, deren Inanspruchnahme in 2050 bei 96 Mio. t liegt. Das heißt, dass trotz der identifizierten und unterstellten Effizienzpotenziale und der deutlich erhöhten Verwendung von Sekundärrohstoffen in der metallverarbeitenden Industrie und im Maschinenbau ein Trend erkennbar ist, der die Effizienzgewinne im Allgemeinen verringert. Zum einen erfordert der zukünftige Aufbau der Energieinfrastruktur Metallrohstoffe in nennenswertem Umfang. Auch die weitere Technisierung von Wirtschaft und Gesellschaft, zum Beispiel im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik<sup>3</sup> und der Medizin, erhöht den Bedarf an Technologie- und Edelmetallen. Zum anderen können Effizienz- und Einsparpotenziale im Wesentlichen in der Inanspruchnahme von Massenmetallen (z. B. Eisen, Kupfer, Blei und Aluminium) erzielt werden. Die Nutzung dieser Metalle geht in 2050 um 74 % im Vergleich zu 2010 zurück. Die Nutzung von Technologie- und Edelmetallen reduziert sich hingegen lediglich um 29 %, wobei der größte Rückgang bei Metallen zur Stahlveredelung zu verzeichnen ist.

In der Gesamtschau zeigt die Entwicklung der ressourcenpolitischen Kenngrößen im GreenEe-Szenario, dass ein ambitionierter Klima- und

Ressourcenschutz gemeinsam voneinander profitieren und somit stärker gemeinsam politisch diskutiert und umgesetzt werden sollten. Mit 7,6 Tonnen/Person (Abbildung 3.4) erreicht das GreenEe-Szenario in 2050 den in der Literatur diskutierten Korridor einer nachhaltigen Rohstoffinanspruchnahme von 5 bis 8 Tonnen/Kopf/Jahr (Bringezu 2015b, IRP 2014f, Fischer-Kowalski, et al. 2011a). Auch kann bei einer jährlichen durchschnittlichen Reduktion des Primärrohstoffeinsatzes von 1,8 % bei gleichzeitig steigendem Wirtschaftswachstum eine absolute Entkopplung von wirtschaftlicher Entwicklung und Rohstoffnutzung deutlich erreicht werden. Mit einer jahresdurchschnittlichen Steigerung von 2,5 % ist somit auch die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität<sup>4</sup> über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRes II (BMUB 2016l) und der Neuauflage der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2017o), die eine Trendfortschreibung des Zeitraums 2000–2010 vorsehen.

#### Systemische Perspektive auf eine globale Transformation

Szenarien zum Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland sollten auch vor dem Hintergrund internationaler Entwicklungen reflektiert werden. Nicht nur die Frage der verfügbaren Gesamtmenge an Rohstoffen, sondern auch die zeitlichen Verläufe, die maximal benötigten Bergbaukapazitäten sowie Produktionskapazitäten für die jeweiligen Technologien der erneuerbaren Energien werden in einem systemdynamischen Simulationsmodell<sup>5</sup> betrachtet. Im Simulationsmodell werden die Inanspruchnahme von Rohstoffen<sup>6</sup> und die verursachten Treibhausgasemissionen der Energieversorgung im zeitlichen Verlauf bilanziert. Es geht nicht darum, exakte Berechnungen und Prognosen zu liefern, sondern das Systemverhalten des oben skizzierten treibhausgasneutralen Energiesystems zu demonstrieren. Hierbei spielen die Größenordnungen der Veränderungen und die Kurvenverläufe die zentrale Rolle für die Gewinnung von qualitativen Erkenntnissen.

Das Energiesystem wird stark vereinfacht durch Windkraft onshore, Windkraft offshore, Photovoltaik sowie PtG/PtL-Techniken und die entsprechend benötigten Leitungen dargestellt. Als Rechengrundlage werden

<sup>3</sup> Es wird im Szenario von einem Anstieg von IKT-Geräten in Haushalten entsprechend dem allgemeinen Wirtschaftswachstum ausgegangen, d. h. dass die zukünftige Geräteversorgung insgesamt ansteigt. In der Industrie und im Dienstleistungsbereich wird hingegen angenommen, dass sich die zusätzliche Rohstoffinanspruchnahme durch den steigenden Bedarf an IKT und Rohstoffeinsparung durch Effizienzsteigerung ausgleichen.

<sup>4</sup> Die Gesamtrohstoffproduktivität errechnet sich aus BIP und dem monetären Wert der Importe/RMI.

<sup>5</sup> GEE(R) – Modell: Globale Erneuerbare Energie und Rohstoffe, FKZ 3716321000.

<sup>6</sup> Eisen, Nicht-Eisen-Unedelmetalle, Halbedelmetalle, Seltenerdenmetalle, Edelmetalle, Industriemineralien, Baumineralien, fossile Rohstoffe.

Tab. 3.2

**Überblick der drei Zukunftsszenarien**

|  | WEO NP-Szenario | WEO 100%RE-Szenario | WEO GreenEe-Szenario |
|--|-----------------|---------------------|----------------------|
| <b>Endenergiebedarf</b>                                  | hoch            | hoch                | niedrig              |
| <b>Anteil erneuerbarer Energien an Energieversorgung</b> | niedrig         | maximal             | maximal              |
| <b>Nutzung fossiler und nuklearer Energie</b>            | ja              | nein                | nein                 |
| <b>Sektorkopplung – direkte Stromnutzung*</b>            | gering          | mittel              | sehr hoch            |
| <b>Sektorkopplung – indirekt PtG/PtL</b>                 | keine           | sehr hoch           | hoch                 |

\* Hier darunter wird Power to Heat und Elektromobilität verstanden.

Quelle: eigene Darstellung

die Referenzanlagen aus (Wuppertal Institut 2014g, Wiesen, et al. 2017l) gewählt. Dementsprechend wird nachfolgend nicht der Einfluss der Anlagentechnik abgebildet. Dies ist Teil noch ausstehender Arbeiten im Rahmen des interdisziplinären Prozesses des UBA. In den vorliegenden Simulationsläufen werden je nach Bedarf und Muster des Ausbauszenarios Anlagenkapazitäten im zeitlichen Verlauf auf- und nach der entsprechenden Lebensdauer wieder abgebaut. Hierzu werden entsprechend dem Inventar des jeweiligen Anlagentyps Rohstoffe im anthropogenen Lager gebunden und eine Recyclingrate nach aktuellem Stand der Technik angenommen. Es werden während des Zubaus an erneuerbaren Energieanlagen hauptsächlich Primärrohstoffe<sup>7</sup> genutzt, bis sich dann nach einer gewissen Zeit ein Gleichgewicht zwischen Zubau und Rückbau einstellt und der Primärrohstoffbedarf durch Recycling<sup>8</sup> auf ein erforderliches Minimum reduziert werden kann. Je nach installierter Leistung erneuerbarer Energieanlagen werden fossile Rohstoffe substituiert, zunächst für die unmittelbare Stromnutzung und zeitlich versetzt zur Bereitstellung von PtG/PtL-Energieträgern zur Substitution von Brenn- und Kraftstoffen sowie den nicht-energetischen Bedarfen an Kohlenstoffträgern, wie es im Kapitel 2.3 zum GreenEe-Szenario dargestellt wird.

Um die systemischen Effekte aufzuzeigen, werden verschiedene Zukunftsszenarien vergleichend

7 Entsprechend der Verfügbarkeit (durch Recycling) werden anteilig auch Sekundärrohstoffe genutzt.  
 8 Vereinfachte Annahme von durchschnittlich 70 % Recyclingrate über alle Rohstoffe. 100% Recycling ist thermodynamisch nicht möglich und ggf. ökologisch nur bedingt vorteilhaft. Die Recyclingrate und -kapazität wird in weiteren Green-Szenarien näher betrachtet werden.

betrachtet. Als Vergleichsgrundlage dient der World Energy Outlook (WEO) (International Energy Agency 2015c) mit seinem New Policies Szenario, das nur einen sehr moderaten Ausbau der erneuerbaren Energien annimmt. Hier werden für unterschiedliche Regionen in der Welt Annahmen sowohl hinsichtlich der Entwicklung der Energienachfrage der jeweiligen Sektoren als auch der Energieträger gemacht. Folgende drei Betrachtungen werden miteinander verglichen<sup>9</sup>:

Das „WEO NP-Szenario“ zeigt die Entwicklung der Endenergienachfrage des New Policies Szenario des WEO. Aus Sicht des UBA stellt dies jedoch keine nachhaltige Entwicklung dar, da noch in größerem Umfang fossile und nukleare Brennstoffe sowie Biomasse genutzt werden.

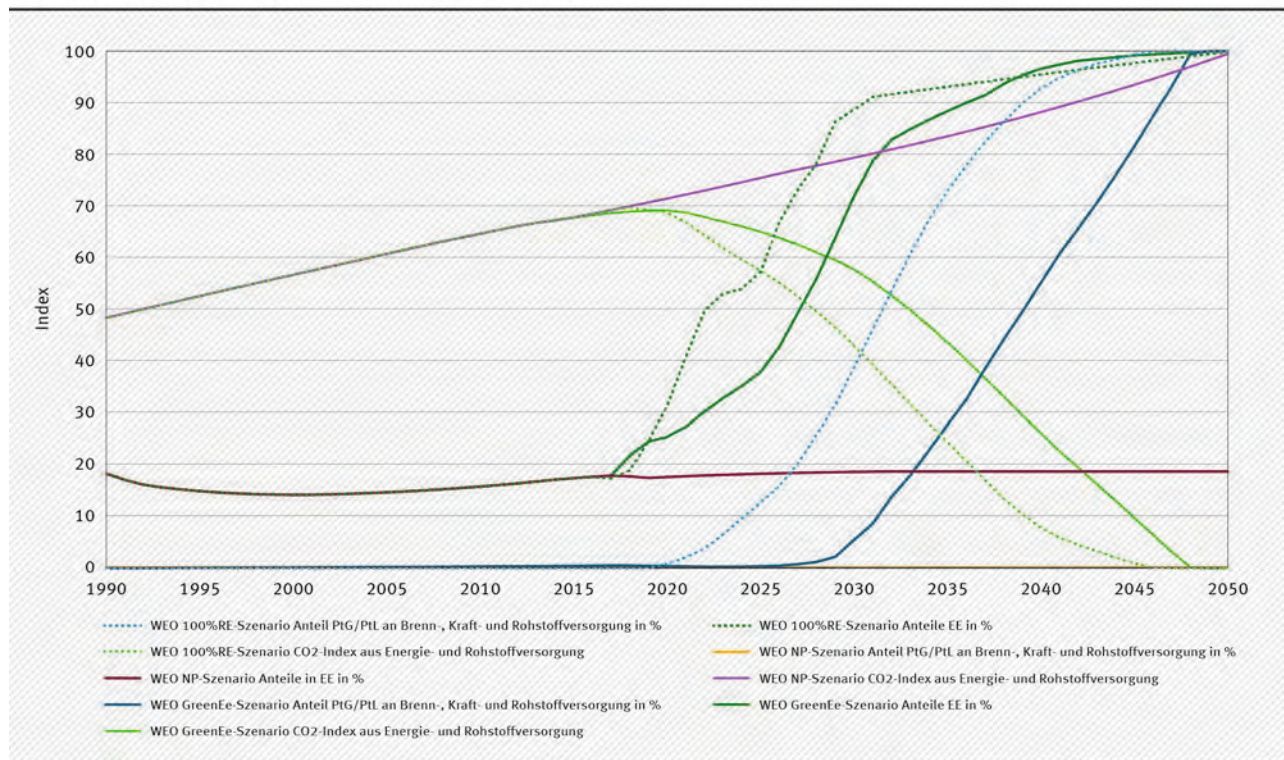
Daher wird in einem zweiten – hypothetischen – Demonstrations-Szenario (WEO 100%RE-Szenario) angenommen, dass eine vollständige Substitution durch erneuerbare Energien erfolgt. Abweichend zum WEO NP-Szenario wird im Sinne der Nachhaltigkeit neben der fossilen Energie auch vollständig die Atomenergie und vereinfachend auch die Biomasse<sup>10</sup> durch andere erneuerbare Energien in identischer

9 Zur Vergleichbarkeit wird der nicht-energetische Bedarf, welcher nicht Teil der Betrachtungen im WEO ist, auf Basis des GreenEe-Szenario und der wirtschaftlichen Entwicklung des WEO hochgerechnet und in allen drei Zukunftsszenarien identisch angenommen.  
 10 Der Anbau von Biomasse zur energetischen Nutzung sollte aus Sicht des Umweltbundesamtes aufgrund der zunehmenden Konkurrenz um fruchtbare Anbauflächen, der unverhältnismäßig hohen Flächenintensität der Energiegewinnung aus Anbaubiomasse im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energiequellen und der sozio-ökonomisch problematische Verknüpfung mit den Lebensmittelpreisen am Weltmarkt sukzessiv entsprechend der heute im Bestand befindlichen Anlagenlebensdauern reduziert werden. (UBA 2014a, UBA 2013a)



Abb. 3.6

## Überblick der systemdynamischen Modellierung\*



\*Kurven zum CO<sub>2</sub>-Index und Anteil EE und Anteil PtG/PtL an Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung sind Jahresmittelwerte. Aufgrund der fluktuierenden Erzeugung der erneuerbaren Energien entstehende saisonale Schwankungen. Die wechselnde Erzeugung wird durch fossile Energie ausgeglichen und in einem erneuerbaren Energiesystem durch Speicher. Das dementsprechende modelltechnische Oszillieren des CO<sub>2</sub>-Index und Anteil EE und Anteil PtG/PtL an Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung bis zu einem vollständigen erneuerbaren Energiesystem in 2050 wurde zur besseren Veranschaulichung geglättet.

Quelle: eigene Darstellung der Simulationsergebnisse

Endenergieform substituiert. Es kommen also weiterhin die heutigen Techniken zum Einsatz (Verbrennungsmotor, brennstoffbasierte Raum- und Prozesswärmeversorgung etc.), deren Energiebedarfe jedoch ausschließlich aus erneuerbaren Energien gedeckt werden.

Die dritte globale Zukunftsentwicklung (WEO GreenEe-Szenario) orientiert sich an dem oben dargestellten GreenEe-Szenario für Deutschland mit hohen Effizienzansprüchen und einem hohen Maß an direkter Stromnutzung.

In Abbildung 3.6 ist ein Überblick zu den drei Simulationen gegeben. Sowohl im WEO 100%RE-Szenario als auch im WEO GreenEe-Szenario erfolgt eine vollständige Reduktion der hier abgebildeten energiebedingten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 (hellgrüne gepunktete und durchgezogene Kurve) durch die vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien (dunkelgrüne gepunktete und durchgezogene Kurve). Im WEO 100%RE-Szenario besteht 2050 jedoch ein deutlich höherer Bedarf an

Stromerzeugungskapazitäten, aufgrund des höheren Strombedarfes für PtG/PtL-Anlagen zur Bereitstellung höherer Mengen an Brenn- und Kraftstoffen, als im WEO GreenEe-Szenario. Um einen annähernd stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien hierfür abzubilden, ist im WEO 100%RE-Szenario ein stärkerer jährlicher Zubau erforderlich und damit auch bis etwa 2040 ein schneller ansteigender Anteil erneuerbarer Energien als im WEO GreenEe-Szenario. Sowohl im WEO 100%RE-Szenario als auch im WEO GreenEe-Szenario wird erst im Jahr 2050 ein vollständig erneuerbares Energiesystem ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen erreicht. Aufgrund der moderaten Nutzung von erneuerbaren Energien und weiterhin intensiven Nutzung fossiler Energien im WEO NP-Szenario (weinrote Kurve) steigen die Treibhausgasemissionen in diesem bis 2050 massiv und kontinuierlich an (lila Kurve). Es wird auch deutlich, dass im WEO 100%RE-Szenario und WEO GreenEe-Szenario eine vollständige Substitution der Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffversorgung durch PtG/PtL erfolgt. Wohin gegen im WEO NP-Szenario keine Substitution dieser fossilen Energieträger erfolgt (gelbe Kurve).

Die unterschiedlichen Zukunftsszenarien weisen auch Differenzen in der Rohstoffinanspruchnahme auf. Diese wird durch den Verbrauch der fossilen Energieträger sowie durch die Festlegung von Rohstoffen im anthropogenen Lager gebildet. Die im anthropogenen Lager festgelegten Rohstoffe stehen nach entsprechender Nutzungsdauer der Wiedernutzung (Recycling) zur Verfügung. Je mehr Rohstoffe aus dem anthropogenen Lager erneut genutzt werden können, desto weniger Primärrohstoffe müssen dem System zugefügt werden.

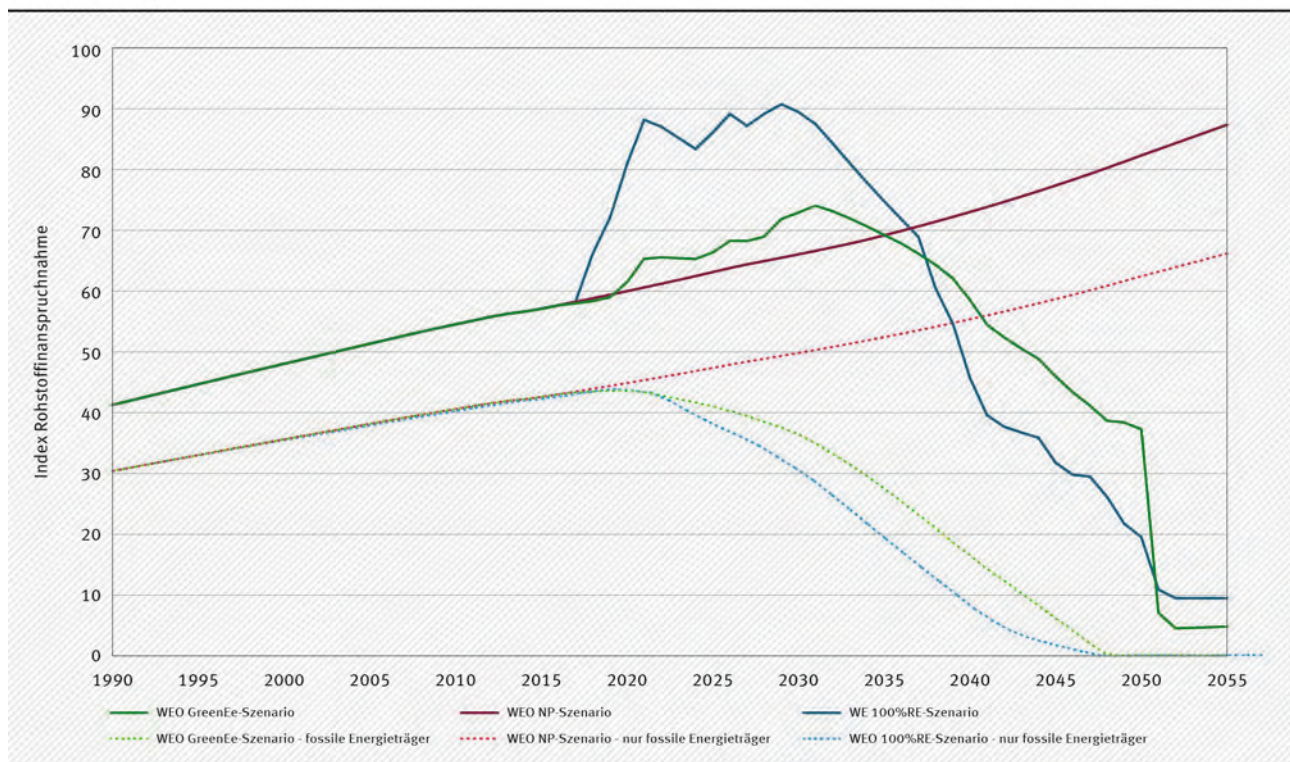
In der folgenden Abbildung 3.7 werden die Primärrohstoffinanspruchnahmen der Energieversorgungssysteme der drei Zukunftsszenarien dargestellt. Hierbei werden der Rohstoffanteil, der in den Aufbau eines erneuerbaren Energiesystems fließt und die fossile Rohstofffraktion, dargestellt. Analog zu den Treibhausgasemissionen in Abbildung 3.6 sinkt die Nutzung der fossilen Rohstoffe WEO 100%RE-Szenario und WEO GreenEe-Szenario bis 2050 auf Null. Gleichfalls analog zu den Ausführungen zur Abbildung 3.6 zum frühen Ausbau der erneuerbaren Energien im WEO-100%RE-Szenario sinkt diese (blau gepunktet) Kurve schon früher als im

WEO-GreenEe-Szenario (grün gepunktete Kurve). Es wird deutlich, dass ein Festhalten an fossilen Energieträgern, wie im WEO NP-Szenario, eine höhere und dauerhaft steigende Primärrohstoffinanspruchnahme mit sich führt, welche nicht in unbegrenzter Weise fortgeführt werden kann. Im zeitlichen Verlauf zeigt sich, dass durch die Umstellung auf eine vollständige erneuerbarer Energieversorgung die Primärrohstoffentnahme des Energieversorgungssystems deutlich reduziert werden kann. Im Verhältnis zu 2010 fast um den Faktor 5. Hauptgrund hierfür ist, dass durch den hohen Anlagenbestand an erneuerbaren Energietechniken nunmehr auch genügend Rohstoffe durch das Recycling am Ende der Lebensphase der Anlagen zur Wiederverwendung zur Verfügung stehen.

Gleichfalls wird beim Vergleich des WEO 100%RE-Szenario zum WEO GreenEe-Szenario deutlich, dass eine „eins zu eins“ Umstellung und Festhalten an heutigen Techniken zu einer deutlich höheren Rohstoffinanspruchnahme im Transformationspfad führt und auch dauerhaft über dem Niveau einer effizient gestalteten Energieversorgung, wie im WEO GreenEe-Szenario, liegt. Das bedeutet konkret,

Abb. 3.7

**Vergleichende qualitative Darstellung zur Primärrohstoffinanspruchnahme der systemdynamischen Betrachtungen**



Quelle: eigene Darstellung der Simulationsergebnisse



dass die Umstellung der Anwendungsbereiche auf die direkte Stromnutzung durch Power to Heat und Elektromobilität – weg von der brennstoffbasierten Energieversorgung – überall erfolgen sollte, wo dies technisch umsetzbar ist. Die Nutzung von regenerativen Energieträgern aus PtG- und PtL-Techniken ist auf ein technisches Mindestmaß zu reduzieren. Nur so kann ein energetisch und rohstofflich effizientes nachhaltiges Energiesystem langfristig erreicht werden.

Auch ist daraus ableitbar, dass der kumulierte Rohstoffaufwand, in einem fossilen Energiesystem (WEO NP-Szenario) stetig ansteigt. Wohingegen bei einer Umstellung auf eine vollständige erneuerbare Energieversorgung und hohe Recyclingquote, der kumulierte Rohstoffaufwand mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien im zeitlichen Verlauf deutlich langsamer ansteigt. Nach Erreichen eines vollständigen erneuerbaren Energiesystems steigt der kumulierte Rohstoffbedarf im Verhältnis zum fossilen Energiesystem nur noch marginal an, da der Primärrohstoffbedarf durch Recycling auf ein Minimum reduziert werden kann. Im WEO GreenEe-Szenario mit einem effizient gestalteten Energiesystem liegt der kumulierte Rohstoffbedarf etwa 10 % unter dem Niveau des WEO 100%RE-Szenario.

Neben dem summarischen Effekt ist bei der Umstellung der Energieversorgung auch der Bedarf einzelner Rohstoffe im Transformationspfad von großem Interesse. Beispielsweise ist Kupfer eines der wichtigen Metalle für ein erneuerbares Energiesystem. Im GreenEe-Szenario (Kapitel 2) ist der Rohstoffbedarf nicht weiter optimiert. Gleichfalls wurde bei der systemdynamischen globalen Simulation erst einmal darauf verzichtet, unterschiedliche Anlagentypen und damit den Einfluss der unterschiedlichen Rohstoffbedarfe (vgl. auch Abbildung 3.2) zu betrachten. Für das Herauskrystallisieren systematischer Muster ist dies nicht erforderlich. Im Modell ist für Windenergieanlagen an Land, die je nach Generatorwahl erheblich den Kupferbedarf beeinflussen, eine Enercon E-82 unterstellt.<sup>11</sup>

Der Kupferbedarf ergibt sich im Modell durch das Voranschreiten der Umstellung des Energieversorgungssystems auf die erneuerbaren Energien Wind onshore, offshore und Photovoltaik sowie die Integration von PtG/PtL-Techniken sowie dem

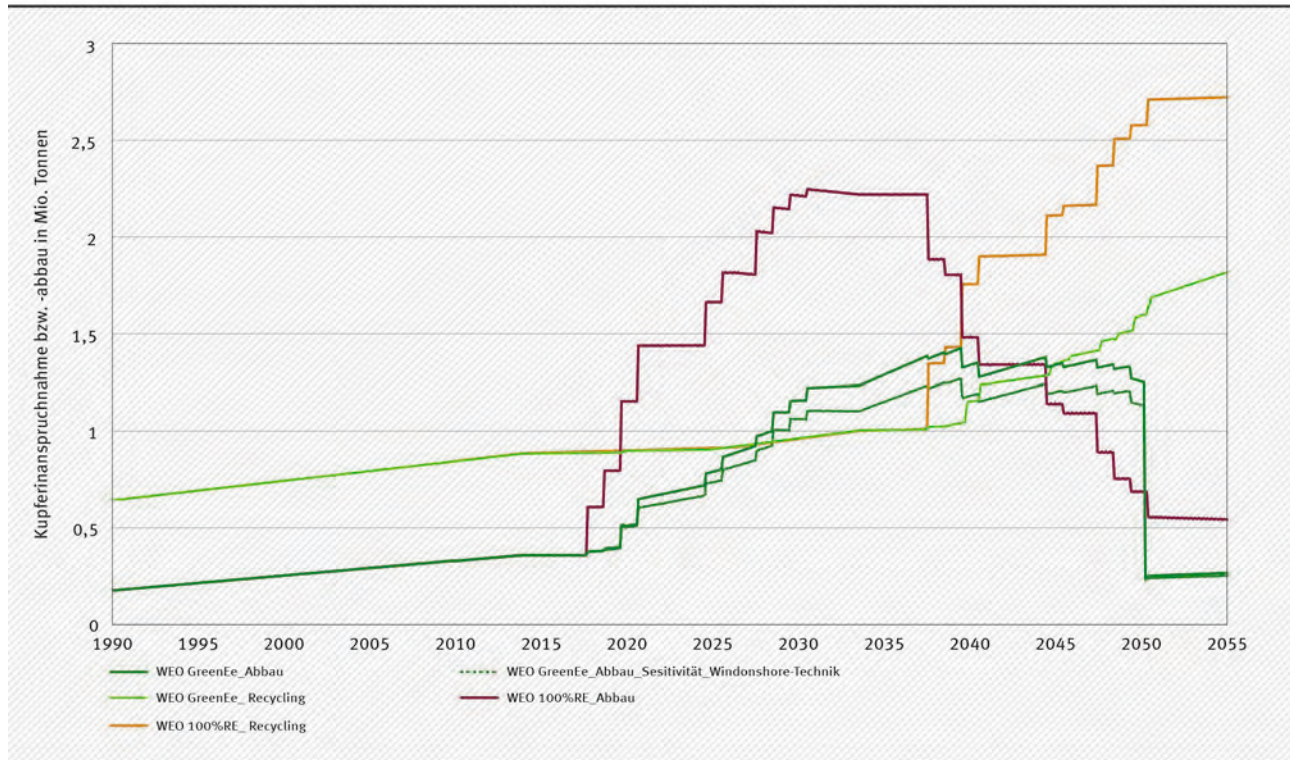
<sup>11</sup> Rahmenannahmen der Referenzanlage: Nennleistung 2,3 MW; Vollaststunden 1.715 h/a; 82m Rotordurchmesser; 108m Nabenhöhe; Material- und Rohstoffaufwand in g/kWh: summarischer Rohstoffaufwand 102,31, davon Eisen 22,69, Nicht-Eisen Unedelmetalle 11,5, Halbedelmetalle 31,23, Edelmetalle 0,02, Baumminerale 21,85, basierend auf (Wiesen, et al. 2017).





Abb. 3.8

**Inanspruchnahme der Kupfermenge hin zu einem erneuerbaren Energiesystem\***



\* Darüber hinaus zusätzliche Bedarfe, bspw. durch Elektromobilität sind nicht im Sockel enthalten.

Quelle: eigene Darstellung der Simulationsergebnisse

Leitungsausbau. Zudem wird ein konstanter Bedarf zur Spiegelung sonstiger Inanspruchnahme (z. B. IKT, Kabel, etc.) berücksichtigt. Die Erkenntnisse der systemischen Analyse sind in Abbildung 3.8 erkennbar. Deutlich wird, dass bei einem höheren Gesamtbedarf an Erzeugungskapazitäten und dennoch stetigem Ausbau, wie im WEO100%RE Szenario unterstellt, der frühzeitig notwendige Ausbau erneuerbaren Energien zu einem frühen und steilen Anstieg der Kupferinanspruchnahme führt (weinrote Kurve). Wohin gegen bei der Hebung der Effizienzpotenziale und effizienter Sektorkopplung, sowie zeitlich erst zum Ende gesteigertem Ausbau für die Bereitstellung von PtG/PtL-Endenergieträgern, wie im WEO-GreenEe-Szenario, der Kupfer-Peak entsprechend später und etwas flacher erfolgt (dunkelgrüne Kurve). In beiden Szenarien wird ein Plateau überschritten und anschließend sinkt die Kupferinanspruchnahme wieder durch das Einsetzen des Recyclings. Entsprechend der unterschiedlichen Bedarfe an erneuerbaren Techniken sind die Recyclingniveaus unterschiedlich hoch (weinrote und dunkelgrüne Kurve). Dies erfolgt entsprechend der im anthropogenen Lager gebundenen Rohstoffe zeitversetzt in beiden Kurven. Die hohe zwischenzeit-

liche Kupferinanspruchnahme könnte zu globalen wirtschaftspolitischen Implikationen bei Bau- und Bergbaukapazitäten führen, so dass auch Rohstoffreserven erschlossen werden könnten, die aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich sind. Gleichfalls wird deutlich, dass bei einem späten gesteigerten Ausbau der erneuerbaren Energien zum Zieljahr 2050 hin unmittelbar danach ein abruptes Absinken des Kupferbedarfes erfolgt (grüne Kurve). Auch vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass ein stetiger Ausbau der erneuerbaren Energie auch den Akteuren der Rohstoffgewinnung Planungssicherheit und zukunftsfähige Perspektiven ermöglicht. Auch das Gleichgewicht aus Zu- und Rückbau kann früher erreicht und gleichmäßiger erfolgen, im Vergleich zu einem abrupten Rückgang des Bedarfs an Rohstoffen und Ressourcen. Für die Simulationen wurden Annahmen für die Kupfervorkommen entsprechend (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014j) verwendet. Es zeigt sich, dass Kupfer nicht limitierend für die Umstellung des Energiesystems ist. Allerdings werden im

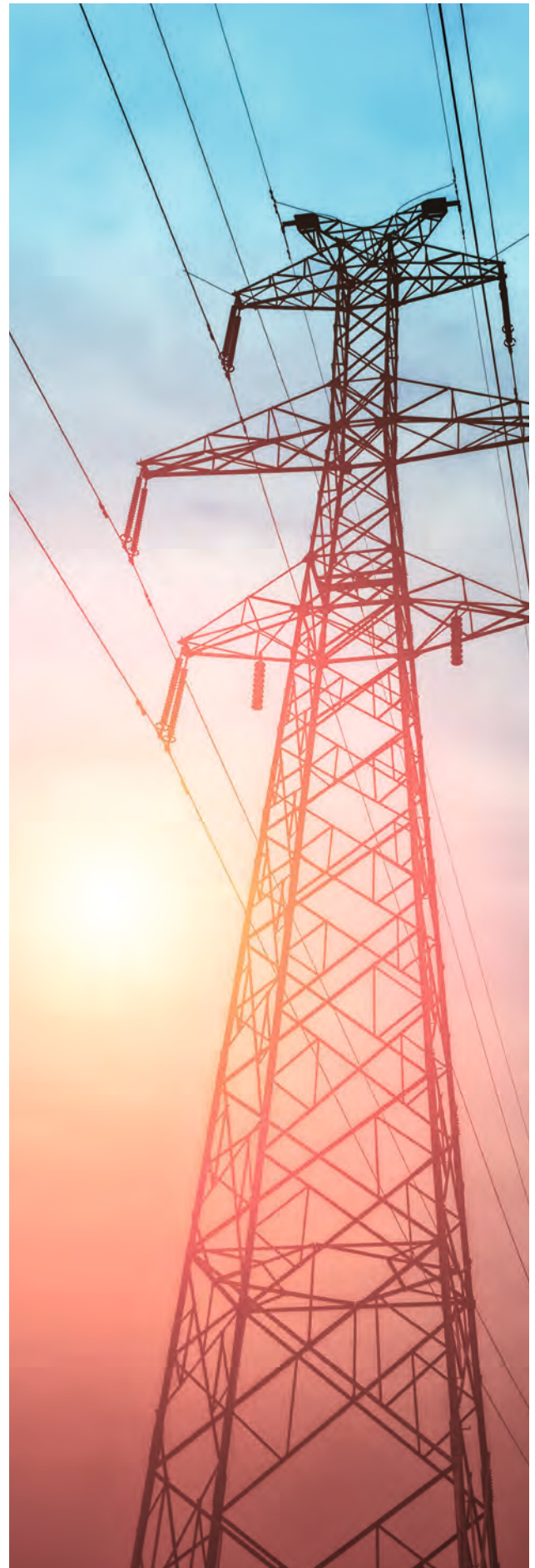


Transformationspfad zunehmend neben „high grade“ auch „low grade“ Rohstoffvorkommen<sup>12</sup> erschlossen.

Damit verbunden sind ökonomische Implikationen, so dass der spätere Zubau und der Ersatz von Anlagen voraussichtlich mit zunehmenden Rohstoffkosten verbunden sein werden.

Wie bereits in Abbildung 3.2 deutlich wurde, kann bereits mit der Technikwahl der erneuerbaren Energieanlage erheblich die Rohstoffinanspruchnahme beeinflusst werden. Vor diesem Hintergrund ist in Abbildung 3.8 als Sensitivität eine Windenergieanlage onshore mit deutlich geringerer Kupferinanspruchnahme dargestellt (grün gepunktete Kurve). Es wird deutlich, dass nach wie vor ein Anstieg mit anschließendem Plateau beim Aufbau eines erneuerbaren Energiesystems durchschritten werden muss. Dennoch können die absolute Höhe, im Beispiel 10% niedriger, sowie die damit verbunden notwendigen Bergbau- und Baukapazitäten und letztlich Rohstoffkosten beeinflusst werden.

Für die Rohstoffpolitik zeigt sich aus den systematischen Betrachtungen, dass ein möglichst früher und stetiger Umbau der Energieversorgung mit rohstoffarmen erneuerbaren Energieanlagen hilft Rohstoffe netto einzusparen. Es zeigt sich auch, dass geringere maximale Rohstoffkapazitäten pro Monat benötigt werden, dass den Akteuren Planungssicherheit geben wird und dass Anpassungsfriktionen reduziert werden, so dass der Umbau der Energieversorgung sehr wahrscheinlich preiswerter erfolgen kann.



12 Im Modell werden vereinfachend drei Gruppen an Erzgehalten in den Lagerstätten verwendet. Damit kann später auch der Aufwand (Energie, Investitionen) geschätzt werden, denn je geringer der Erzgehalt, desto aufwendiger und energie- und kostenintensiver wird der Abbau. High grade umfasst die Metall-Konzentrationen von 10 – 400 kg /tonne, low grade von 2 – 10 kg / tonne Erz und ultra low grade 2-0,4 kg/tonne. (Sverdrup und Ragnarsdóttir 2014j)







An aerial photograph of a rural landscape. The scene is dominated by vibrant green fields, likely pastures or meadows, interspersed with clusters of trees. A dirt road or path winds through the landscape, curving from the bottom left towards the center. To the right, a section of the land is plowed, showing dark brown soil with visible furrows. The lighting suggests a bright, sunny day, casting soft shadows from the trees and the road.

# 4

**Fazit und Handlungsbedarf  
zur Umsetzung des  
Transformationsprozesses**





Das vorliegende Szenario „GreenEe“ zeigt, dass es möglich ist, Deutschland sowohl treibhausgasneutral als auch ressourcenschonend umzugestalten. Den Einsparungen von Treibhausgasen und Rohstoffen durch den Ausstieg aus fossilen Energieträgern einerseits steht die erhöhte Inanspruchnahme von Rohstoffen für den Aufbau des erneuerbaren Energiesystems andererseits gegenüber. Es gelingt aber im GreenEe-Szenario gleichzeitig, die THG-Emissionen um 95 % gegenüber 1990 und die Primär-Rohstoffinanspruchnahme (RMC) absolut von 1.370 Mio. t um knapp 60 % gegenüber 2010 auf ein nachhaltigeres Niveau bis 2050 zu senken. Bei einzelnen Rohstoffen (z. B. Kupfer) ist aber mit einem deutlich gesteigerten weltweiten Bedarf zurechnen, wobei die Nachfrage für bestimmte Zeiträume drastisch ansteigen kann.

Das Szenario zeigt, dass ein verbundener ambitionierter Klima- und Ressourcenschutz hilft, beide Ziele zu erreichen. Eine solche systemische Vorgehensweise sollte künftig stärker politisch diskutiert und realisiert werden.

Mit diesem Szenario wurden aber sicherlich nicht alle Fragen und Möglichkeiten einer Transformation hin zu einem nachhaltigen Deutschland erschöpfend behandelt. Einige dieser Fragen werden in weiteren „Green“-Szenarien untersucht und Ende 2018 – Anfang 2019 vorgestellt. Die Ergebnisse der fünf Szenarien werden dann in verschiedenen Transformationspfaden den Lösungsraum konkretisieren, wie ein treibhausgasneutrales und ressourcenschonendes Deutschland 2050 und darüber hinaus gestaltet werden kann. Dazu werden wesentliche Parameter, wie Energieeffizienz über alle Anwendungsbereiche, Anstrengungsniveaus bei der Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen im Transformationspfad, Rohstoffinanspruchnahmen der Techniken und Änderungen der Lebensstile betrachtet. Die Ergebnisse des in dieser Publikation vorgestellten ersten Szenarios „GreenEe“ sind somit als erster Input zu den Diskussionen zu verstehen, wie Klima- und Ressourcenschutz zusammenhängen und politisch verbunden und systemisch gemeinsam adressiert werden sollten.

Für die Gestaltung des Transformationsprozesses ergeben sich auf Basis dieses ersten Szenarios folgende Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarfe:

**Gemeinschaftliches internationales Voranschreiten**  
Klima- und Ressourcenschutz sind keine lokal oder national begrenzten Herausforderungen. Vielmehr stellen sie globale Anforderungen an die Weltgemeinschaft und sollten gemeinschaftlich vorangetrieben werden. Deutschland sollte parallel zu den eigenen Aktivitäten international und europäisch darauf hinwirken, dass auch andere Staaten eine Treibhausgasneutralität bis 2050 anstreben (UBA 2016j). Gemeinschaftliches Voranschreiten bedeutet, frühzeitig nachhaltige Kooperationen mit anderen Staaten einzugehen. Insbesondere Forschung, Entwicklung und Verbreitung der Kenntnisse um die erneuerbaren Energietechniken und der Ressourcenschonung sind konsequent auszubauen.

Für regenerative PtG/PtL-Importe besteht entsprechend der Szenarioergebnisse bereits 2030 ein Bedarf, welcher einen frühzeitigen Ausbau von erneuerbaren Energieanlagen im Ausland erfordert. Es kann kaum davon ausgegangen werden, dass Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien im Ausland exklusiv für den deutschen Bedarf errichtet und genutzt werden. Bei diesem Ausbau ist zudem zu gewährleisten, dass weltweit lokale und regionale Akteure merklich und im Sinne gleichberechtigter Partner profitieren. Es ist auch eine Entwicklungschance für Regionen mit einem hohen Potential an erneuerbaren Energien.

Deutschland trug und trägt als Industriestaat stark zum Klimawandel und zur globalen Ressourceninanspruchnahme bei. Der daraus resultierende Wohlstand – aber auch das Technologiewissen – verpflichten zu besonderem Engagement, für eine integrierte und systemische Klima- und Ressourcenschutzpolitik.

#### **Ambitionierte Ziele**

Um den Klimawandel und die globale Erwärmung zu begrenzen, bedarf es ambitionierter und umfangreicher Ziele und Maßnahmen zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung. Das UBA hält es daher für notwendig, dass die Bundesregierung ambitionierte Ziele für 2050 beim Klimaschutz, die Treibhausgasminderung um 95 % gegenüber 1990, und bei der Ressourcenschonung die substantielle Senkungen der Ressourceninanspruchnahme verbindlich festlegt. In der internationalen Diskussion wird aktuell ein Zielkorridor von 3 bis 8 Tonnen pro Capita und





Jahr vorgeschlagen.<sup>1</sup> Der Transformationspfad sollte stetig gestaltet werden, um allen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Akteuren langfristig Planungs-, Investitions- und Entscheidungssicherheit zu gewährleisten.

Für den Transformationspfad wird bis 2030 das im Klimaschutzplan und im Energiekonzept der Bundesregierung festgelegte Treibhausgasminderungsziel in Höhe von 55 % gegenüber 1990 als ein Mindestbeitrag für eine stetige Entwicklung Deutschland hin zu einer nachhaltigen Gesellschaft betrachtet, das auf keinen Fall unterschritten werden sollte. Eine 95-prozentige Minderung bis 2050 erfordert ambitioniertere Minderungsziele für 2030 und 2040.

Um den globalen Rohstoffeinsatz auf ein nachhaltiges Niveau zu senken, müssen insbesondere Industrieländer wie Deutschland ihre Rohstoffinanspruchnahme deutlich reduzieren. Deutschland hat sich 2002 als eines der ersten Länder ein konkretes Ziel

zur Steigerung der Rohstoffproduktivität gesetzt und dieses mit dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) fortentwickelt. Dieses muss auch für den Zeitraum nach 2030 ambitioniert fortgeschrieben werden. Daneben ist es insbesondere notwendig, den Rohstoffbedarf absolut zu senken und entsprechende ambitionierte Ziele festzulegen.

#### **Ausstieg aus fossilen Energien**

Ein Verzicht auf fossile Energien ist sowohl aus einer Klima- wie auch aus einer Ressourcenschutzperspektive unabdingbar. Ein Festhalten an fossilen Energieträgern führt dauerhaft zu einem Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre und einer steigenden Primärrohstoffinanspruchnahme. Beides kann nicht in unbegrenzter Weise fortgeführt werden.

In der Stromversorgung können auch noch heute die größten Treibhausgasminderungseffekte durch den Ausbau der erneuerbaren Energien erzielt werden. Für die nationale Energiewirtschaft bedeutet dies, dass Kohlekraftwerke im Rahmen eines geordneten und zügigen Strukturwandels abgeschaltet werden müssen. Die Reduzierung der Braunkohlenutzung muss mit einem geordneten Strukturwandel in den

<sup>1</sup> Siehe hierzu: (Lehmann & Schmidt-Bleek, 1993a; Schmidt-Bleek, 1993b);(Bringe zu, 2015b; IRP, 2014f; Fischer-Kowalski, et al., 2011a) und die Beschlüsse der G7 von Elmau und Toyama (BMUB, 2016h) und der G20 von Hamburg (G20 Germany 2017, 2017m).



deutschen Braunkohleregionen gekoppelt werden. Dieser Strukturwandel sollte durch die Erschließung regionalwirtschaftlicher Alternativen soziale Härten abfedern.

### **Ausbaukorridore der erneuerbaren Energien erhöhen und verstetigen**

Wind on- und offshore sowie Photovoltaik sind tragende Säulen einer erneuerbaren Energieversorgung in Deutschland. Die derzeitigen Ausbaukorridore werden der für die notwendige Klima- und Ressourcenschutzpolitik notwendigen Sektorkopplung<sup>2</sup> nicht gerecht bzw. reichen nicht einmal aus, um den absehbaren Rückbau mittelfristig zu substituieren. Die notwendigen Treibhausgasminderungseffekte durch die Integration von Sektorkopplungstechniken, wie beispielsweise Elektromobilität und Power to Heat, können nur gewährleistet werden, wenn der Ausbau der erneuerbaren Energien deutlich über die bisher im EEG festgeschriebenen Ausbaukorridore hinaus erfolgt.

Auch aus industriepolitischer Sicht und für die Planungssicherheit ist eine deutliche und dauerhafte Erhöhung der Ausbaukorridore notwendig, welche einen stetigen Ausbau und auch mögliche Anpassungsfriktionen durch den Rückbau bzw. das Repowering von Anlagen berücksichtigen. Auch kann nur so die unmittelbar damit verknüpfte Rohstoffbereitstellung zum Aufbau dieser Infrastrukturen verstetigt und auch in diesen Wirtschaftsbereichen Planungssicherheit und Zukunftsfähigkeit gewährleistet werden. Bei einem verspäteten und zeitlich gedrängterem Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2050 zur Erreichung des Treibhausgasminderungsziels würde es wahrscheinlich zu zwischenzeitlich hohen bis sehr hohen Rohstoffbedarfen mit entsprechend deutlichen wirtschaftspolitischen Implikationen für die Rohstoffgewinnung kommen.

Und zuletzt kann nur durch einen stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien ein geordneter Um- bzw. Rückbau des fossil basierten Systems erfolgen.

---

<sup>2</sup> Unter Sektorkopplung wird die stärkere Verzahnung des Strom-, Wärme-, Brenn-, Kraftstoff- und Rohstoffmarktes verstanden. Sektorkopplung ermöglicht durch direkte oder indirekte Verwendung von regenerativem Strom eine treibhausgasneutrale Versorgung aller Anwendungsbereiche bzw. die vollständige Substitution fossiler Energieträger und Rohstoffe. Sektorkopplung erhöht die Flexibilität im Stromsystem und unterstützt so die Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung.



**Energieeffizienz und energieeffiziente Sektorkopplung**

Effiziente Sektorkopplung, also die Substitution fossiler Energieträger durch direkte oder indirekte Stromnutzung über alle Anwendungsbereiche hinweg, ist neben dem Ausbau der erneuerbaren Energien und der Erschließung der vorhandenen Energieeffizienzpotenziale eine zentrale Säule im Klima- und Ressourcenschutz. Das Festhalten an heutigen Techniken, wie beispielsweise Verbrennungsmotoren, und eine „Eins zu Eins“-Substitution fossiler Energieträger durch regenerative Energieträger (PtG/PtL) würde zu deutlichen höheren Strombedarfen und Rohstoffinanspruchnahmen führen.

Die Integration der Sektorkopplungstechniken und der entsprechende Umbau der dazugehörigen Infrastrukturen sollten im Transformationspfad entsprechend ihres Substitutionspotenzials erfolgen. Die Umstrukturierung der Energieversorgung muss daher Hand in Hand mit der Umstrukturierung in den Anwendungsbereichen gehen. Dies bedeutet konkret, dass PtX-Techniken, wie Elektromobilität und Power to Heat insbesondere in Verbindung mit Wärmepumpen frühzeitig zum Einsatz kommen sollen, da sie bereits heute einen positiven Klimaschutzeffekt bewirken können. Auch in der Industrie ist die Integration von PtX-Techniken und insbesondere Power to Heat, welche oft mit der Umstellung von Prozesstechniken verbunden sind, von großer Bedeutung für den Klimaschutz und durch entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsprojekte voranzutreiben.

Um den notwendigen summarischen Strombedarf und damit die Anlagen erneuerbarer Energien sowie deren Rohstoffinanspruchnahme zu begrenzen, sollten Energieeinspar- und Effizienzpotenziale über alle Energieanwendungen hinweg konsequent erschlossen werden und überall dort, wo es technisch möglich ist, sollte eine Umstellung der Anwendungsbereiche auf die direkte Stromnutzung erfolgen. Die Nutzung von regenerativen Energieträgern aus PtG- und PtL-Techniken ist auf ein technisches Mindestmaß zu reduzieren, um den Aspekten der Energieeffizienz und dem Ressourcenschutz gerecht zu werden.

Gleichfalls sind im Laufe des Transformationsprozesses Kohlenwasserstoffe aus PtG/PtL Prozessen frühzeitig dort einzusetzen, wo sie vor dem Hintergrund der langfristigen Treibhausgasminderungsziele notwendig sind. Dies bedeutet konkret den Einsatz in relevanten Produktionsprozessen der chemischen

Industrie von langlebigen Produkten, deren energetische Verwertung am Ende einer Kaskadennutzung erst nach 2050 erfolgen könnte. Auch für den frühzeitigen Einsatz von PtL-Energieträgern im Flugverkehr besteht dringender Handlungsbedarf. Nur so kann gewährleistet werden, dass das Ziel der ICAO (International Civil Aviation Organisation) zum treibhausgasneutralen Wachsen ab 2020 neben global markt-basierten Maßnahmen nicht durch den Einsatz von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse erfolgt.

**Gesunde Ernährung**

Treibhausgasinderungen können im Bereich Landwirtschaft nur zu einem bestimmten Teil durch technische Maßnahmen erzielt werden. Um bis 2050 die notwendige Minderung von mindestens 50 % zu erreichen, sind zusätzlich geänderte Produktionssysteme und vor allem ein Abbau der Tierbestände notwendig. Um Verlagerungseffekte in andere Länder zu vermeiden, muss parallel der Konsum tierischer Produkte, v. a. von Fleisch, auf ein Maß reduziert werden, das einer gesunden Ernährung (z. B. nach den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V.) entspricht.

Auf das Ernährungssystem bezogen bedeutet das, die Tierhaltung für die Fleisch- und Milchproduktion, aber auch das gesamte Transport-, Verarbeitungs- und Entsorgungssystem sind entsprechend umzugestalten. Eine ausgewogene, saisonale, regionale und wenig vorverarbeitete Ernährung kann einen wichtigen Beitrag sowohl zum Klimaschutz als auch zur Ressourcenschonung leisten.

**Rohstoffeffizienzpotenziale nutzen**

Die vollständige Erschließung bekannter Ressourceneffizienzpotenziale ermöglicht eine deutliche und beschleunigte Reduktion der Rohstoffinanspruchnahme. Spätestens mit der Verabschiedung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRes) in 2012 und dessen erster Fortschreibung 2016 hat die Forschung zu rohstoffsparenden und ressourceneffizienten Produktionstechniken und Produkten vielfältige Potenziale aufgezeigt und die Politik die notwendigen Rahmenbedingungen zu deren Umsetzung stetig verbessert. Hier gilt es, die Aktivitäten ambitioniert fortzusetzen und auch Innovationen zu fördern, um weitere Effizienzsteigerungen zu ermöglichen. Dabei müssen Regelungen und ökonomische Anreize vor allem zur Verlängerung der Lebensdauer, gesteigerten Nutzung von Sekundärrohstoffen und

zur Materialsubstitution verstärkt einbezogen werden. Wie im Bereich der Ernährung ist zukünftig zu untersuchen welche nicht-technischen Maßnahmen (z. B. Konsumänderung, „Sharing – Economy“) hier einen Beitrag leisten können.

#### **Technikwahl entscheidet über Rohstoffbedarf**

Die Auswahl der jeweiligen Anlagentechnik hat einen entscheidenden Einfluss auf die benötigten Rohstoffe. Es gilt daher insbesondere bei der Transformation des Energiesystems, der notwendigen Umstellung auf Elektromobilität, der energetischen Sanierung und der Umstrukturierung der industriellen Prozesstechniken verstärkt auch auf die notwendigen Rohstoffbedarfe zu achten. Wie sich gezeigt hat, gilt es dabei auch, die richtige Balance zwischen Klimaschutz und Ressourcenschonung hinsichtlich der Ausbaugeschwindigkeit zu finden, um eventuell Rohstoffbedarfsspitzen zu minimieren und notwendige Techniken und Infrastrukturen zur Sekundärrohstoffgewinnung aufzubauen. Dies gilt umso mehr bei einem, aus unserer Sicht notwendigem gemeinsamem internationalem Voranschreiten zur Treibhausgasneutralität. Wesentlich ist auch im Sinne einer ressourcenschonenden Stadt- und Infrastrukturentwicklung verstärkt rohstoffeffiziente technische

und planerische Lösungen zu implementieren, um den Bedarf insbesondere an Baumineralien weiter zu senken.

#### **Fortführung dieser interdisziplinären Forschungen und Forschungsbedarf**

Diese Studie leistet einen ersten Diskussionsbeitrag zur Verknüpfung von Klima- und Ressourcenschutz auf dem Weg hin zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland. Diese Arbeiten und Forschungen werden im Rahmen des interdisziplinären UBA-Projektes fortgeführt.

Aus unserer Sicht sollten folgende Aspekte dabei und darüber hinaus berücksichtigt werden:

- Die kombinierte Betrachtung von Klima- und Ressourcenschutz ist notwendig, um den Herausforderungen der erforderlichen Energie-, Ressourcen- und Verkehrswende gerecht zu werden. Es handelt sich hierbei allerdings um komplexe Systeme, die eine sorgfältige Untersuchung von Instrumenten und Maßnahmen erfordern, wenn verhindert werden soll, dass es zu unerwünschten Nebeneffekten kommt.





- ▶ Im Rahmen der weiteren Szenariendarstellungen und darüber hinaus müssen andere und weitere Techniken und Systemkonstellationen betrachtet werden. Es müssen weitergehende Untersuchungen vorgenommen werden, wie und in welcher Reihenfolge bzw. Geschwindigkeit der kombinierte Aus- und Umbau der Energiesysteme und Anwendungsbereiche organisiert sowie die für diese Umsetzung notwendigen Techniken entwickelt werden können.
  - ▶ Es müssen verstärkt Betrachtungen der notwendigen Rohstoffbedarfe und Möglichkeiten ihrer Reduktion von den für die Transformation notwendigen Techniken, Verfahren und Produkten durchgeführt werden. Daher wird das UBA in der Fortführung dieser interdisziplinären Studie in einem weiteren Szenario („GreenMe“) die Auswahl relevanter Techniken variieren und weitere Schlüsselbereiche anhand ihrer Rohstoffeffizienz gestalten. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, wie sich bisher bekannte Vor- und Nachteile von technischen Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und Energiebedarfe<sup>3</sup>, die sich im Wesentlichen aus der Nutzung von fossilen Energieträgern ergeben, in einem zukünftigen erneuerbaren Energiesystem entwickeln.
  - ▶ Soziale Aspekte inkl. Verteilungsfragen und nachhaltiger Entwicklungsperspektiven müssen bei der Entwicklung konkreter Instrumente von Anfang an mitgedacht werden, um keine unerwünschten Probleme zu erzeugen.
  - ▶ Letztlich gilt es zu beleuchten, welche volkswirtschaftlichen und gesellschaftlichen Implikationen sich sowohl hinsichtlich der Akzeptanz als auch der notwendigen Veränderung von Produktions- und Konsummustern aus einer solch tiefgreifenden Transformation national als auch international ergeben.
- Forschungsvorhaben und gemeinsam mit externen Partnerinnen und Partner, weiterhin intensiv mit dem Nexus Klima- und Ressourcenschutz beschäftigen. Dabei werden auch Fragen der notwendigen Instrumentierung der Transformation einen besonderen Fokus einnehmen.
- Letztendlich ist festzuhalten, dass mit dem vorliegenden ersten Beitrag bereits demonstriert werden konnte, wie Klima- und Ressourcenschutz Hand in Hand auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland agieren können. Es ist ein Impuls zur notwendigen systemischen und integrierten Politikgestaltung im Nexus Klima- und Ressourcenschutz.

Die Arbeiten an den weiteren Szenarien des hier vorgestellten interdisziplinären UBA-Projektes sollen Beiträge zur Beantwortung der oben skizzierten Fragen liefern. Darüber hinaus wird sich das UBA in den nächsten Jahren, unterstützt durch weitere

---

<sup>3</sup> So ist aktuell der erhöhte Rohstoffbedarf für Elektrofahrzeuge unter anderem auf den (fossilen) Energiebedarf in der Produktion zurückzuführen, dem gegenüber sind die positiven Effekte der Gebäudedämmung auch auf die Rohstoffeinsparungen durch die verringerte Nutzung von fossilen Energieträgern zurückzuführen.









5

Literaturverzeichnis 



**AGEB.** „www.ag-energiebilanzen.de.“ Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2015. 04. 04 2017h. [http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=energieflussbild-2015\\_tj\\_lang\\_de\\_20170404.pdf](http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=energieflussbild-2015_tj_lang_de_20170404.pdf) (Zugriff am 19.9.2017).

**AGEB.** www.ag-energiebilanzen.de. 07 2017f. <http://www.ag-energiebilanzen.de/> (Zugriff am 19.9.2017).

**BMUB.** Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Berlin: BMUB, 2016l.

**BMUB.** Resource Efficiency in the G 7. <http://www.bmub.bund.de/en/topics/economy-products-resources-tourism/resource-efficiency/resource-efficiency-in-the-g7/>, 04. 08 2016h.

**BMUB.** „www.bmub.bund.de.“ Nationale Klimapolitik, Klimaschutzplan 2050. 11 2016f. [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf) (Zugriff am 19.9.2017).

**BMUB.** „www.bmub.bund.de.“ Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). 02 2012b. [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pools/Broschueren/progress\\_broschuere\\_de\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/progress_broschuere_de_bf.pdf) (Zugriff am 19.9.2017).

**BMVI.** Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Schlussbericht, BMVI, 2014b.

**BMWI.** „www.bmwi.de.“ Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen. 05 2017d. [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen.pdf?__blob=publicationFile&v=10) (Zugriff am 13.09.2017).

—. „www.erneuerbare-energien.de.“ Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. 02 2017i. [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigati-on/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigati-on/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html) (Zugriff am 19.9.2019).

**Bringezu, Stefan.** „Possible Target Corridor for Sustainable Use of Global Material Resources.“ resources (www.mdpi.com/journal/resources), 2015b: 25-64.

**BUND & Misereor (Hersg).** Zukunftsfähiges Deutschland. Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser Verlag, 1996a.

**Bundesnetzagentur.** www.bundesnetzagentur.de. 31. 03 2017e. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen\\_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/kraftwerkliste-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/kraftwerkliste-node.html) (Zugriff am 19.9.2017).

**Bundesregierung.** Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie – Neuauflage 2016. Berlin: Bundesregierung, 2017o.

**Bundesregierung.** Strategie 2002: Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin: Bundesregierung, 2002a.

**BMUB.** „www.bmub.bund.de.“ Projektionsbericht der Bundesregierung 2017. 26. 04 2017g. [http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2017/?tx\\_ttnews%5BbackPid%5D=217](http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/klima-klimaschutz-download/artikel/projektionsbericht-der-bundesregierung-2017/?tx_ttnews%5BbackPid%5D=217) (Zugriff am 19.9.2017).

**Clarke, Leon, et al.** „Assessing Transformation Pathways.“ In IPCC 2014: Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change – Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, von Ottomar Edenhofer, et al., IPCC AR5 WG3,Ch6,Seite 433. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, 2014e.

**Deilmann, Clemens, Karin Gruhler, und Norbert Krauß.** „www.ioer.de.“ Projekte/ Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau. Endbericht im Forschungsprogramm Zukunft Bau. 07 2014c. [https://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER\\_Projekte/PDF/FB\\_E/Endbericht\\_REP.pdf](https://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER_Projekte/PDF/FB_E/Endbericht_REP.pdf) (Zugriff am 18. 09 2017).

**EEA.** „www.eea.europa.eu.“ Publication; More from less – material resource efficiency in Europe. 2016g. [https://www.eea.europa.eu/publications/more-from-less/at\\_download/file](https://www.eea.europa.eu/publications/more-from-less/at_download/file) (Zugriff am 19.9.2017).

**Ekins, Paul, et al. UNEP.** Resource Efficiency: Potential and Economic Implications. A report of the International Resource Panel Report. International Resource Panel Report, Nairobi, Kenia: UNEP, 2017b.



- Fischer-Kowalski, Marina, et al.** UNEP. Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel, Nairobi, Kenia: UNEP, 2011a.
- G20 Germany 2017.** „www.g20.org.“ Annex to G20 Leaders Declaration – G20 Resource Efficiency Dialogue. 17. 03 2017m. [https://www.g20.org/Content/DE/\\_Anlagen/G7\\_G20/2017-g20-resource-efficiency-dialogue-en.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.g20.org/Content/DE/_Anlagen/G7_G20/2017-g20-resource-efficiency-dialogue-en.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am 20. 09 2017).
- Haberkern, Bernd, Werner Maier, Ursula Schneider, Arbeitsgemeinschaft iat – Ingenieurberatung für Abwassertechnik.** „Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen.“ Forschungsbericht, Dessau-Roßlau: UBA, 2008a
- Hertwich, Edgar G., et al.** UNEP: Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production. Report of the International Resource Panel, Nairobi, Kenya: UNEP, 2016n.
- International Energy Agency.** CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion. Bericht, Paris, France: IEA, 2016k.
- International Energy Agency.** World energy Outlook 2015 (WEO). Bericht, Paris: IEA, 2015c.
- IPCC.** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)], Geneva, Switzerland: IPCC, 2014h.
- IRP.** „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.“ 07. 02 2014f. <http://www.resourcepanel.org/file/244/download?token=OHRPH1MH> (Zugriff am 19.9.2017).
- Krausmann, Fridolin, Simone Gingrich, Nina Eisenmenger, Karlheinz Erb, Helmut Haberl, und Marina Fischer-Kowalski.** „Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century.“ Ecological Economics 68(10), 2009a: S. 2696–2705, Online material (Update Aug. 2011).
- Lehmann, Harry, und Friedrich Schmidt-Bleek.** „Material flows from a systemical point of view.“ Fresenius Environmental Bulletin Vol. 2, No. 8, 1993a.
- Osterburg, Bernhard, Stephanie Kätsch, und Anne Wolff.** „Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050.“ Thünen-Report, Sachverständigen Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Rosslau, 2013b.
- Ritthoff, Michael, Thomas Hanke, Karin Bienge, Jens Teubler, Matthieu Saurat, und Bettina Bahn-Walkowiak.** 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 Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes, 191 Seiten, Wuppertal, Dessau-Roßlau: UBA, 2015d.
- Rüter, Sebastian, Wolfgang Stürmer, und Karsten Dunger.** „Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien.“ AFZ-Der Wald, 13 2017c: 30–31.
- Schmidt-Bleek, Friedrich.** „MIPS – Revisited.“ Fresenius Environmental Bulletin 2/8 1993, 1993b.
- Statistisches Bundesamt.** „www.destatis.de.“ Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. 28. 04 2015a. [https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204159004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bevoelkerung/VorausberechnungBevoelkerung/BevoelkerungDeutschland2060Presse5124204159004.pdf?__blob=publicationFile) (Zugriff am 19.9.2017).
- Sverdrup, Harald U., und Kristín Vala Ragnarsdóttir.** Natural Resources in a Planetary Perspective. Geochemical perspectives, 3(2), 129-341. Houten, The Netherlands: www.geochemicalperspectives.org, doi:10.7185/geochempersp.3.2, 2014j.
- UBA.** Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050 – Endbericht. Dessau-Roßlau: UBA, 2016c.
- UBA.** Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Dessau-Roßlau: UBA, 2016a.

**UBA.** Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Bericht, Dessau-Roßlau: UBA, 2016i.

**UBA.** Klimaschutz im Verkehr: Neuer Handlungsbedarf nach dem Pariser Klimaschutzabkommen – Teilbericht des Projekts „Klimaschutzbeitrag des Verkehrs 2050“. Teilbericht, Dessau-Roßlau: UBA, 2017a.

**UBA.** Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. Dessau-Roßlau: UBA, 2016b.

**UBA.** Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung – Diskussionsbeitrag des Umweltbundesamtes. Positionspapier, Dessau-Roßlau: UBA, 2016j.

**UBA.** Klimawirksamkeit des Flugverkehrs. Hintergrundpapier, Dessau-Roßlau: UBA, 2012a.

**UBA.** Nachhaltiges Deutschland Wege zu einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung. Studie, Berlin: UBA, 1998a.

**UBA.** Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 – Studie. Dessau-Roßlau: UBA, 2014a.

**UBA.** Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen. Endbericht vom ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau: UBA, 2016m.

**UBA.** „www.umweltbundesamt.de.“ 2016 weltweit wärmstes Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen „Chronik weltweiter Temperaturen, Niederschläge und Extremereignisse seit 2010“. 28. 07 2017k. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chronik-weltweiter-temperaturen-niederschlaege> (Zugriff am 19.9.2017).

**UBA.** „www.umweltbundesamt.de.“ Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“. 04. 05 2017j. <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland> (Zugriff am 19.9.2019).

**UBA.** „www.umweltbundesamt.de.“ UBA/Publikationen. 06 2013a. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/globale-landflaechen-biomasse> (Zugriff am 14.9.2017).

**UBA.** „www.Umweltbundesamt.de.“ Datentabelle zum Endenergieverbrauch. 07 2016d. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4\\_datentabelle-zur-abb\\_eev-sektoren-et\\_2017-02-17.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_datentabelle-zur-abb_eev-sektoren-et_2017-02-17.pdf) (Zugriff am 13.9.2017).

**UBA, Umweltbundesamt.** „Nationale Inventarbericht – Resubmission.“ 2016e.

**Wiesen, Klaus, et al.** „Analyse des Rohstoffaufwandes der Energieinfrastruktur in Deutschland.“ Sachverständigen-gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes – Wuppertal, Dessau-Roßlau, 2017l.

**World Meteorological Organization (WMO).** „public.wmo.int.“ WMO Statement on the State of the Global Climate in 2016 /WMO-No. 1189). 2017n. [https://library.wmo.int/opac/doc\\_num.php?explnum\\_id=3414](https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=3414) (Zugriff am 21.9.2017).



**Wuppertal Institut.** KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht, Berlin: BMWI, 2014g.







► **Diese Broschüre als Download**  
[bit.ly/2dowYYI](http://bit.ly/2dowYYI)

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