



HINTERGRUND // OKTOBER 2013

Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050

Für Mensch & Umwelt

**Umwelt 
Bundesamt**

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiet I 2.2
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Telefax: (0340) 2103-0
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

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

Autorinnen und Autoren:

Rosemarie Benndorf, Maja Bernicke, Andreas Bertram, Wolfgang Butz, Folke Dettling, Johannes Drotleff, Cornelia Elsner, Eric Fee, Christopher Gabler, Christine Galander, Yvonne Hargita, Reinhard Herbener, Tim Hermann, Fabian Jäger, Judith Kanthak, Hermann Kessler, Yvonne Koch, David Kuntze, Martin Lambrecht, Christian Lehmann, Harry Lehmann, Sandra Leuthold, Insa Lütkehus, Kerstin Martens, Felix Müller, Klaus Müschen, Diana Nissler, Sebastian Plickert, Katja Purr, Almut Reichart, Jens Reichel, Hanno Salecker, Jens Schuberth, Dietrich Schulz, Ulla Strenge, Marlene Sieck, Bärbel Westermann, Kathrin Werner, Christine Winde, Dietmar Wunderlich, Brigitte Zietlow

Autoren der Kurzfassung des Kapitels Landwirtschaft sind Bernhard Osterburg, Stephanie Kätsch und Anne Wolff, unter inhaltlicher und redaktioneller Mitarbeit von Diana Nissler und Dietrich Schulz. Die Ergebnisse beruhen auf Osterburg, Bernhard; Kätsch, Stephanie; Wolff, Anne (2013): Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050, Thünen-Report, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Autoren der Kurzfassung des Kapitels Verkehr sind Ruth Blanck, Peter Kasten, Florian Hacker und Moritz Mottschall, unter inhaltlicher und redaktioneller Mitarbeit von Martin Lambrecht. Die Ergebnisse beruhen auf Blanck, Ruth; Kasten, Peter; Hacker, Florian; Mottschall Moritz (2013): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario der zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes.

Redaktion:

Kathrin Werner, Diana Nissler, Katja Purr

Druck:

Hausdruckerei Umweltbundesamt

Broschüren bestellen:

Umweltbundesamt
c/o GVP
Postfach 30 03 61 | 53183 Bonn
Service-Telefon: 0340 2103-6688
Service-Fax: 0340 2104-6688
E-Mail: uba@broschuerenversand.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Im Internet über <http://www.uba.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050> als PDF-Dokument einsehbar und herunterzuladen.

Bildquellen:

Titel: © Bernd Müller, BMU Bilderdatenbank
S.4, S.7, S.13, S.16, S.19, S.20: shutterstock.com

Stand: Oktober 2013

Inhalt

4	Deutschland im Jahr 2050: 1 Tonne CO_{2Äq} pro Kopf und Jahr
5	Die Szenarioanalyse für ein treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050
8	Treibhausgasemissionen im Jahr 2050
9	Senkung der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren
9	Energie
13	Verkehr
15	Industrie
18	Abfall und Abwasser
20	Landwirtschaft
24	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF)
25	Überlegungen zu den Wechselwirkungen zwischen Ressourcenproduktivität und Treibhausgasvermeidung
27	Fazit/Diskussion
30	Fußnoten
30	Quellenverzeichnis



Deutschland im Jahr 2050: 1 Tonne CO₂ pro Kopf und Jahr

Die Industriestaaten tragen eine sehr große Verantwortung für den globalen Umweltschutz. Sie haben ihr heutiges Wohlstandsniveau durch die Nutzung fossiler Energieträger erreicht, sie haben die weltweiten Ressourcen ausgebeutet und intensive Landnutzung betrieben und sind damit Hauptverursacher eines Großteils heutiger Umweltprobleme wie der globalen Klimaerwärmung.

Der Klimawandel ist bereits im Gange. Die internationale Staatengemeinschaft hat sich unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen das Ziel gesetzt, eine gefährliche Störung des Klimasystems mit nicht mehr beherrschbaren Folgen zu verhindern. Das globale Klima soll sich in diesem Jahrhundert nicht um mehr als 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter erwärmen.

Das gemeinsam gesetzte Klimaschutzziel wird nur erreichbar sein, wenn alle Staaten ihre Treibhausgasemissionen (THG), also z. B. von Kohlendioxid (CO₂), Methan oder Lachgas, ihren eigenen Kapazitäten entsprechend so weit wie möglich reduzieren. Dies bedeutet für heutige Industrieländer wie Deutschland, dass sie nahezu treibhausgasneutral werden müssten: sie müssen ihre Emissionen um etwa 80–95 % gegenüber 1990¹ reduzieren.

Ein treibhausgasneutrales Deutschland mit einem jährlichen Pro-Kopf-Ausstoß von einer Tonne CO₂ im Jahr 2050 ist technisch möglich. Dies entspricht einer Minderung um rund 95 % gegenüber 1990.

Das folgende Szenario¹¹ zeigt ein mögliches treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Es enthält keine Aussage darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Entwicklung eintritt – und es ist keine Prognose. Wir zeigen, dass Deutschland prinzipiell bis 2050 seine Treibhausgasemissionen um 95 % gegenüber 1990 senken kann. Das gilt für ein Deutschland, das auch im Jahr 2050 ein hoch entwickeltes Industrieland mit heutigem Lebensstil und ähnlichen Konsum- und Verhaltensmustern ist. Die Studie stellt keine Prognose der künftigen Entwicklung dar, sondern beschreibt eine von verschiedenen Möglichkeiten, wie ein treibhausgasneutrales Deutschland aussehen könnte. Es wird immer deutlicher, dass es bei der Umstellung des Energiesystems auf ein treibhausgasneutrales Wirtschaftssystem beträchtliche Gestaltungsspielräume gibt. In jedem Fall wird der Umstieg des Energiesystems auf erneuerbare Energien eine Schlüsselfrage einnehmen. Die Energiewende und die Umsetzung ambitionierter Klimaschutzziele sind damit eine politische und gesellschaftliche Aufgabe, die vom Ende her gedacht und gestaltet werden muss: eine praktisch vollständig treibhausgasneutrale Wirtschafts- und Lebensweise.

Wesentliche Schritte hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland haben hohe Interdependenzen mit der Entwicklung innerhalb der EU und setzen eine europäische Politik voraus, die mindestens sehr hohe Treibhausgasminderungsziele für die gesamte Union verfolgt und nationale Politiken zur Treibhausgasneutralität unterstützt.

Die Szenarioanalyse für ein treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050

Das Umweltbundesamt (UBA) untersucht seit einigen Jahren, wie das Klimaziel „Treibhausgasneutrales Deutschland“ erreicht werden kann. Um diese Frage zu beantworten hat das UBA einen interdisziplinären Prozess gestartet. Die Stromerzeugung wurde wegen ihrer hohen Emissionen als Erstes untersucht, und es wurde 2010 gezeigt, dass eine Stromerzeugung aus 100 % erneuerbaren Energien möglich ist.¹

Schon damals war klar, dass eine Energieversorgung mit erneuerbaren Energien allein nicht ausreichen wird, um die Treibhausgasemissionen nahezu vollständig zu vermeiden. Auch andere Wirtschaftsbereiche müssten sich deutlich verändern und verstärkt THG-arme Techniken einsetzen.

Die nun vorgelegte Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland – kurz: THGND – 2050“ bezieht daher alle relevanten Emissionsquellen in die Untersuchung

ein, die im jährlich erstellten Nationalen Inventarbericht (NIR)² zum Treibhausgasinventar beschrieben werden. Betrachtet werden also neben der kompletten Energieversorgung einschließlich des Wärme- und Verkehrssektors auch die THG-Emissionen von Industrie, Abfallwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie aus Landnutzungsänderungen. Wir entwickeln hierzu ein Zielszenario, Transformationspfade zu diesem Ziel und die damit verbundenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und die Auswahl geeigneter politischer Instrumente sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

Für die Szenarioanalyse gehen wir davon aus, dass Deutschland im Jahre 2050 ein exportierendes Industrieland mit einem bis dahin durchschnittlichen jährlichen Wirtschaftswachstum von 0,7 % des Bruttoinlandsprodukts ist.

Ein treibhausgasneutrales Deutschland in europäischer und internationaler Perspektive

Mit der Studie wird gezeigt, dass Treibhausgasneutralität in Deutschland in der Zukunft technisch machbar ist. Das Szenario betrachtet dies aus einer rein nationalen Perspektive und bezieht Wechselbeziehungen zu anderen Ländern nicht mit ein. Grundlage der Untersuchung ist ein nationales Treibhausgas-Minderungsziel von 95 %, das – nach den getroffenen Annahmen – durch technische Maßnahmen in Deutschland erreicht werden kann. Dem folgend basieren die Berechnungen allein auf den Treibhausgasemissionen, die innerhalb Deutschlands entstehen. Deutschland ist jedoch sowohl über Handelsströme als auch über internationale Verträge mit anderen Staaten verbunden. Das wirkt sich sowohl auf die Verursachung von Treibhausgasen als auch auf die Handlungsoptionen für den Klimaschutz aus.

Nicht betrachtet wurde aufgrund des in dieser Studie gesetzten Untersuchungsrahmens die für importierte Güter im Ausland anfallende Emissionsmenge. Umgekehrt werden Emissionen für exportierte Güter nicht herausgerechnet. Ebenso wenig werden unter bestimmten Umständen mögliche Produktionsverlagerungen ins Ausland betrachtet (carbon leakage). Verlagert zum Beispiel eine große Industrieanlage ihren Standort von Deutschland nach Portugal und beliefert von dort den deutschen Markt, werden ihre Treibhausgasemissionen nicht mehr in den deutschen Emissionen, sondern im portugiesischen Inventar erfasst. Im deutschen Emissionsinventar werden entsprechend weniger Emissionen ausgewiesen. Rechnerisch ergibt sich dadurch für Deutschland eine Emissionsminderung, obwohl die Produkte der Industrieanlage nach wie vor in Deutschland konsumiert werden und so zusätzliche Treibhausgasemissionen in Portugal verursacht werden. ▶

Für diese Studie wurde die Annahme getroffen, dass die bisher in Deutschland ansässigen Industriezweige auch weiter hier tätig sind. Ausgehend von der heutigen Industriestruktur wurden die notwendigen technischen Anpassungen in den Prozessen beschrieben. Bei einer Untersuchung der wirtschaftlichen und regulatorischen Voraussetzungen für ein treibhausgasneutrales Deutschland sollte die Gefahr der Emissionsverlagerung mit untersucht werden. Einzelne augenfällige Verlagerungseffekte wurden in der Studie adressiert (vgl. Fazit/Diskussion, S. 27).

Grundsätzlich ist denkbar, Treibhausgasneutralität neben technischen Maßnahmen und Verhaltensänderungen innerhalb Deutschlands auch durch Anrechnung von Emissionsminderungsmaßnahmen im Ausland zu flankieren. Da Emissionsminderung zur Bekämpfung des Klimawandels eine globale Herausforderung ist, kann eine Finanzierung von Minderungsmaßnahmen im Ausland ökonomisch vorteilhafter sein als die Beschränkung auf nationale Minderungsaktivitäten. Die erzielten Emissionsminderungen können dabei dem Geldgeber angerechnet werden. Solche Instrumente sind unter den Bezeichnungen Joint Implementation (JI) und Clean Development Mechanism (CDM) zum Beispiel im Kyoto-Protokoll bereits vereinbart. Dabei betont aber das Kyoto-Protokoll den Anspruch, Minderungen hauptsächlich im eigenen Land zu erreichen und auswärtige Minderungen nur ergänzend anzurechnen. Die Fortsetzung und Anpassung mengenbasierter „flexibler“ Instrumente hängt allerdings auch stark von der Ausgestaltung eines neuen Klimaschutzabkommens auf internationaler Ebene ab. Die Verhandlungen dazu sollen 2015 abgeschlossen werden.

Als Mitgliedsstaat der Europäischen Union unterliegt Deutschland im Bereich der Umweltpolitik und des europäischen Binnenmarkts den EU-Regeln. Deshalb ist es wichtig, neben nationalen Anstrengungen auch gemeinschaftsweit, günstige Rahmenbedingungen für Treibhausgasneutralität zu schaffen. Die EU hat sich selbst ebenso wie alle Mitgliedsstaaten zum 2°-Ziel bekannt. In weiteren Schritten sollte daher untersucht werden, wie sich ein treibhausgasneutrales Europa realisieren ließe und welche Synergieeffekte zwischen den Staaten sich dabei erschließen lassen. Auch hierbei ist die globale Perspektive, insbesondere die Gefahr bloßer Emissionsverlagerungen aus der EU ins Ausland, zu berücksichtigen.

Das Ziel der folgenden Ausführungen ist es, die technische Machbarkeit einer treibhausgasneutralen Gesellschaft in dem angenommenen Zieljahr („2050“) in Deutschland darzustellen. Zudem basieren die Berechnungen darauf, dass Technologien, mit denen Treibhausgase vermieden und die Energieeffizienz gesteigert werden kann und die heute noch in der Erprobungsphase sind, im Jahr 2050 flächendeckend eingesetzt werden. Entsprechend geht die Darstellung von erheblichen technischen Fortschritten und Veränderungen aus.

Verhaltensänderungen wie Entwicklung und Verbreitung anderer Lebensstile oder die Entwicklung veränderter Konsummuster werden in dieser Studie weitgehend nicht unterstellt, auch wenn sie aus Sicht

des Umweltbundesamtes aus Nachhaltigkeitsgründen für wünschenswert und notwendig gehalten werden. Der Schwerpunkt der Studie liegt damit bewusst auf dem Einsatz technischer Lösungen, mit denen die Klimaziele unter Berücksichtigung ökologischer und gesundheitlicher Grenzen erreicht werden können. Zusammenhänge zwischen technischen Lösungen und verhaltensbedingter Treibhausgasvermeidung gehen gleichwohl unter anderem in den Kapiteln Verkehr, Landwirtschaft und Abfall in die Betrachtung ein.

Dabei verwenden wir in der Analyse den Stand der besten heute verfügbaren Techniken und setzen keine neuen Erfindungen, wohl aber Weiterentwicklung und Innovationen bei heutigen Techniken voraus.



Die Studie basiert desweiteren auf der Annahme, dass die Bevölkerungszahl in Deutschland von 82,5 Mio. Einwohnern im Jahr 2005 bis 2050 um nahezu 12,5 % abnimmt. Im Jahr 2050 werden demnach noch etwa 72,2 Millionen Menschen in Deutschland leben. Dieser Annahme^{II} liegen eine annähernd gleichbleibende Geburtenrate von 1,4 Kindern je Frau, ein moderater Anstieg der Lebenserwartung und eine durchschnittliche jährliche Nettozuwanderung von 150.000 Menschen zugrunde.³

Neben Klimaschutz gibt es weitere Leitplanken einer nachhaltigen Entwicklung in Deutschland^{III}, zum Beispiel:

- ▶ die Senkung der Ressourcennutzung um 50 % bis 2020 und um 90 % bis 2050,

- ▶ den erhaltenden Umgang mit Böden und eine auf 30 Hektar täglich gesenkte Neuversiegelung bis 2020 mit dem Ziel insgesamt langfristig keine Böden mehr zu versiegeln.

Auf diese Leitplanken geht die Studie jedoch nicht im einzelnen ein, wohl wissend, dass dies genauer untersucht werden muss.

Es ist unser Anliegen so weit wie in den verschiedenen Sektoren möglich, Lösungsräume zu beschreiben und damit verschiedene Alternativen aufzuzeigen, etwa durch Variationen der Parameter und Techniken oder durch unterschiedliche Szenarioansätze.

Treibhausgasemissionen im Jahr 2050

Der in dieser Studie verwendete Begriff „treibhausgasneutral“ besagt in einer engen Auslegung, dass ein bestimmtes Produkt oder ein bestimmter Prozess keine Treibhausgase freisetzt. In dieser Publikation verwenden wir den Begriff auch für niedrigste, tendenziell klimaverträgliche Emissionsmengen. Einem „treibhausgasneutralen“ Deutschland billigen wir dementsprechend ein Emissionsbudget von rund 60 Mio. t CO₂Äq zu. Das entspricht einem Minderungsniveau von 95 % gegenüber 1990 für 2050. Dies bedeutet, dass der gegenwärtige Pro-Kopf-Ausstoß von Treibhausgasen in Deutschland von etwa elf Tonnen pro Jahr und Kopf auf ungefähr eine Tonne reduziert werden müsste. Dabei sind ausschließlich Treibhausgasemissionen erfasst, die in Deutschland entstehen und im Nationalen Emissionsinventar erfasst werden. Indirekte Emissionen, die durch importierte Güter in anderen Ländern verursacht werden, werden nicht einbezogen.

Wie sich die im Jahr 2050 verbleibenden Emissionen auf die einzelnen Verursacher aufteilen, zeigt Tabelle 1. Aus Praktikabilitätsgründen wurden hier abweichend von der NIR-Systematik die Industrieprozesse (Sektor 2 nach dem Common Reporting Format (CRF) der internationalen Klimaberichterstattung) sowie Lösemittel und andere Produktverwendungen (CRF Sektor 3) zusammengefasst. Abbildung 1 veranschaulicht die Senkung der Treibhausgase um 95 % gegenüber dem Bezugsjahr 1990.

Tabelle 1

Verteilung der Treibhausgasemissionen im UBA THGND 2050 – Szenario

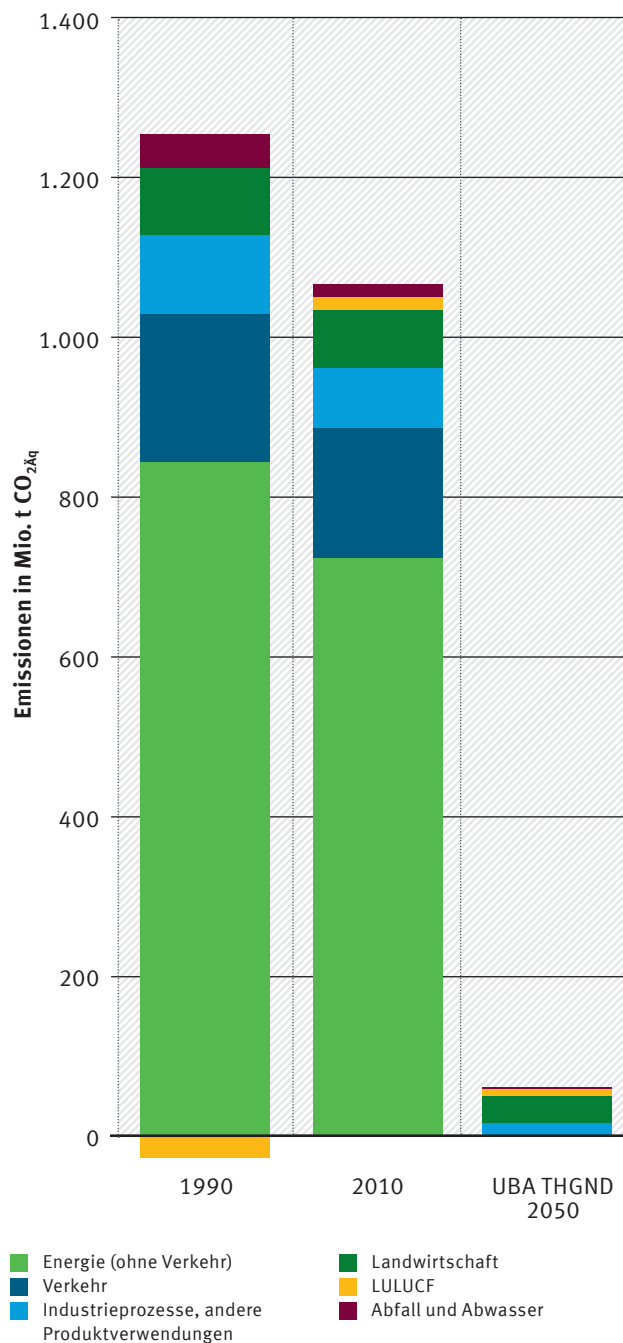
Emissionsquelle	CO ₂ Äq in Mio. t
Energie ^I	0
Industrieprozesse, Lösemittel und andere Produktverwendungen	14
Landwirtschaft	35
LULUCF ^{II}	8
Abfall	3
Summe	60

I Inklusive Verkehr, verarbeitendes Gewerbe etc.
 II Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

Quelle: Umweltbundesamt, 2013

Abbildung 1:

Treibhausgasemissionen^{I,II}



I 1990 und 2010 nach NIR.
 II Verkehr ohne internationalen Anteil am See- und Flugverkehr.

Quelle: Umweltbundesamt, 2013

Senkung der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren

Tabelle 2

Gesamter Endenergieverbrauch im Jahr 2050 im UBA THGND 2050 – Szenario

	Strom in TWh	regeneratives Methan in TWh	flüssige regenerative Kraftstoffe in TWh
private Haushalte	104,7	44,5	0
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)	90,3	62,4	18,6
Industrie energetisch ^{I,II}	179,7	198,8	0
Verkehr	91,1	0	533,3
Summe energetisch	465,8	305,7	551,9
		1.323,4	
Industrie stofflich		282	
Summe stofflich und energetisch		1.605,4	

I Exklusive der 15,1 TWh aus internen Produktströmen in der Papierindustrie.

II Über den Strombedarf für Prozesse hinaus (siehe Absatz Industrie) wird Strom für die Bereitstellung von Raumwärme, Beleuchtung und Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) benötigt.

Quelle: Umweltbundesamt, 2013

Energie

Die Emissionen im Energiesektor sinken von 1.028 Mio. t CO_{2,Äq} im Jahr 1990 auf nahezu Null im Jahr 2050. Dies ist möglich, indem vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt wird und die Effizienzpotenziale zugleich weitgehend ausgeschöpft werden. Über eine vollständige regenerative Stromversorgung^{IV} hinaus, wird auch eine vollständig regenerative Versorgung mit Brenn- und Kraftstoffen aufgezeigt.

Die Folge davon ist ein sehr stark ansteigender Stromverbrauch um alle Sektoren zu versorgen: Der langfristige Endenergiebedarf an Strom in einem treibhausgasneutralen Deutschland wurde mit ca. 466 TWh/a, an Brennstoffen mit 305 TWh/a, an Kraftstoffen mit 552 TWh/a und an regenerativen Einsatzstoffen für die chemische Industrie mit 282 TWh/a abgeschätzt (siehe Tabelle 2 sowie Absatz Verkehr und Industrie). Werden diverse Verluste bei Bereitstellung und Transport der Endenergieträger berücksichtigt, ergibt sich in einer groben Näherung eine notwendige Nettostromerzeugung von rund 3.000 TWh/a.

Für eine nachhaltige Energieversorgung orientieren wir uns an folgenden Leitplanken:

- Das Umweltbundesamt hält den Anbau von Biomasse zum alleinigen Zweck einer energetischen Nutzung für nicht vertretbar – insbesondere wegen Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen und negativen Auswirkungen auf Wasser, Boden,

Biodiversität und Naturschutz.⁴ Der Einsatz von Biomasse erfolgt in dieser Studie im Jahr 2050 daher nur insoweit sie aus Abfällen und Reststoffen gewonnen werden kann (Kaskadennutzung). Aus diesem Grund kann die Biomassenutzung nur einen sehr geringen Beitrag für das Gesamtsystem leisten.

- Darüber hinaus wird die Nutzung fossiler Energieträger in Verbindung mit CCS^V aufgrund verschiedener Umweltauswirkungen und Nutzungskonkurrenzen im Untergrund nicht berücksichtigt.
- Die Nutzung von Atomkraft wird in dieser Studie ausgeschlossen.

Wir gehen stattdessen davon aus, dass Strom überwiegend aus Wind- und PV-Erzeugungsanlagen bereitgestellt wird, entsprechend der inländischen und globalen Potentiale. Wasserkraft- und Geothermianlagen tragen in geringerem Maße zur Stromversorgung bei.

Zentraler Baustein einer vollständig regenerativen Energieversorgung ist die Erzeugung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse mit Hilfe von erneuerbar erzeugtem Strom. Aus Wasserstoff können durch weitere katalytische Prozesse Methan und weitere Kohlenwasserstoffe erzeugt werden. Die strombasierte Erzeugung von Wasserstoff oder Methan aus Strom wird im Folgenden als Power-to-Gas (PtG), die von flüssigen Kohlenwasserstoffen als Power-to-Liquid (PtL) bezeichnet.

Entsprechend der technischen Möglichkeiten in den Anwendungsbereichen ergeben sich verschiedene Lösungen im Endenergieträgermix. Der jeweilige Anteil dieser drei Energieträger im Endenergieträgermix ist aus technischen Gründen begrenzt. Eine qualitative Darstellung des denkbaren Lösungsraums für diese Zusammensetzung ist zum besseren Verständnis in Abbildung 2 dargestellt. In Abbildung 8 sind der mögliche Anwendungsbereich von Power to Gas und Power to Heat dargestellt.

Eine Versorgung allein mit regenerativem Strom als Endenergieträger ist nicht möglich. Strom kann vor allem im Verkehrsbereich, insbesondere im Flug- und Seeverkehr, nicht überall direkt eingesetzt werden. Strom ist als Endenergieträger in vielen Anwendungsbereichen, zum Beispiel in der Kommunikationstechnik oder Beleuchtung, aber nicht verzichtbar. In einem regenerativen Energiesystem ist ein sehr hoher Anteil von Strom als Endenergieträger realistisch. So erwarten wir langfristig, dass sich die Wärmeversorgung und Prozesswärmebereitstellung hin zu einer strombasierten Versorgung verschieben. Der mögliche Anteil von Wasserstoff im Endenergieträgermix ist nach oben hin ebenfalls technisch begrenzt, so ist er zum Beispiel für Langstreckenflüge nicht einsetzbar. Am anderen Ende des Lösungsraums ist eine treibhausgasneutrale Energieversorgung ohne Wasserstoff als Endenergieträger zwar denkbar. Ein höherer Wasserstoffanteil ist jedoch vorteilhaft, weil er gegenüber

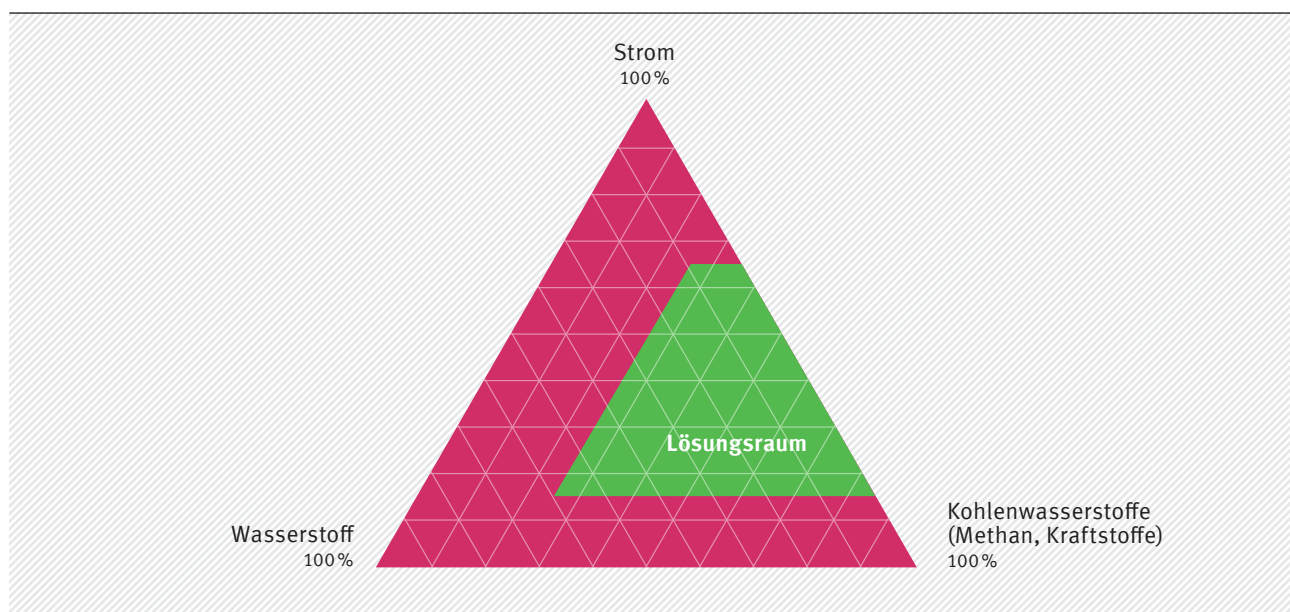
Methan und anderen Kohlenwasserstoffen energetisch effizienter erzeugt werden kann und weil keine Kohlenstoffquelle benötigt wird, um ihn zu erzeugen. Hier besteht jedoch vor allem bei der Nutzung von Wasserstoff noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff wurde in unserer Studie aus Kapazitätsgründen nicht quantitativ modelliert. Seine direkte Nutzung ist teilweise als sinnvoll anzusehen. Hierzu sind weitere Analysen notwendig.

Regenerativ erzeugte Kohlenwasserstoffverbindungen sind als Brenn- und Kraftstoffe in einem treibhausgasneutralen Energiesystem sowie in der Industrie unabdingbar. Dafür muss jedoch eine treibhausgasneutrale Kohlenstoffquelle in ausreichender Menge verfügbar sein. Wichtige Einflussgrößen für den Anteil der einzelnen Energieträger sind energetische Verluste, Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit von Ressourcen und die Erschließbarkeit von Anwendungsbereichen bzw. Technikentwicklungen.

In der Studie wird gezeigt, dass der Endenergieverbrauch 2050 gegenüber 2010 halbiert^{VI} werden kann (siehe Abbildung 3). Vor allem bei den privaten Haushalten sind erhebliche Verbrauchsminderungen beim Strom- und Wärmeverbrauch möglich. Auch in der Industrie und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) ergibt sich entsprechend der Annahmen mindestens eine Halbierung des Endenergiebedarfes.

Abbildung 2:

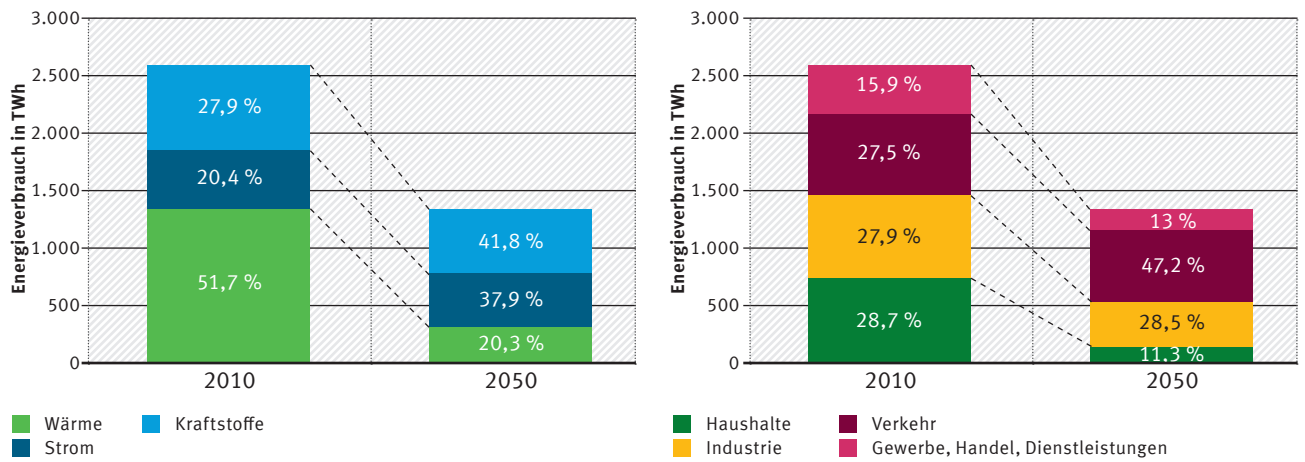
Qualitative Darstellung des Endenergieträgermixes im UBA THGND-Szenario in einem Dreiecksdiagramm.



Quelle: Umweltbundesamt 2013

Abbildung 3:

Vergleich der Endenergie im Jahr 2010 und 2050 im UBA THGND 2050-Szenario (links: Darstellung nach Anwendungen, rechts: Darstellung nach Sektoren)^{I,II}



I Im Verkehr werden bei der Bilanzierung für den Seeverkehr bisher nur die inländischen Bunkermengen einbezogen und nicht der deutsche Anteil am internationalen Seeverkehr. Ähnlich wird im Flugverkehr verfahren. Im Rahmen dieser Bilanzgrenzen wird eine erhebliche Minderung erreicht. Bezieht man jedoch den deutschen Anteil am internationalen See- und Flugverkehr mit ein, ergibt sich im Vergleich zu 2010 nur eine geringe Senkung des Endenergieverbrauchs.
 II Ohne Endenergie in Form von regenerativem Methan als Einsatzstoff in der chemischen Industrie (aufgrund der derzeitigen Bilanzierungsweise).

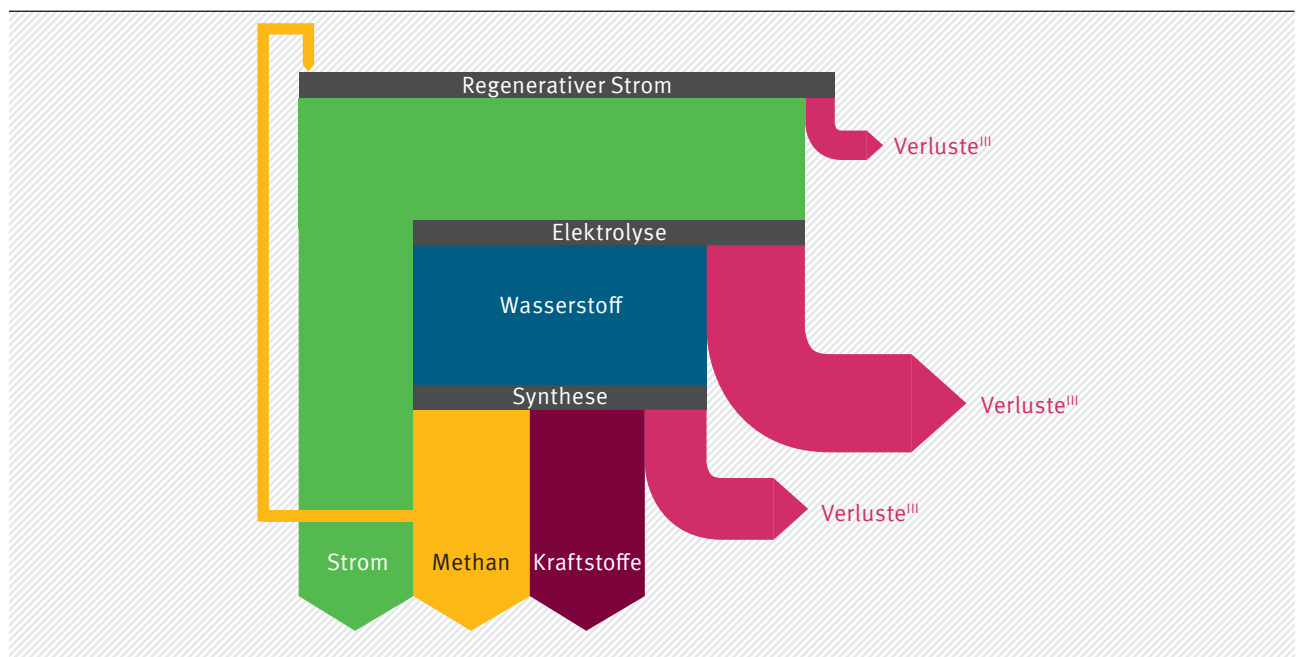
Quelle: Umweltbundesamt, 2013

Die Endenergie wird vornehmlich durch regenerativen Strom bereitgestellt. Zum besseren Verständnis ist der mögliche Energiefluss auf Basis der vorangegangenen Beschreibungen qualitativ in der folgenden Abbildung 4 dargestellt. Nicht mit abgebildet werden die weiteren Transportverluste beim Import von regenerativen Gasen und Kraftstoffen. Auch Wasserstoff haben wir als Endenergieträger in unserem Szenario

zunächst nicht eingesetzt (s. o., Ausführungen zum Wasserstoff im Lösungsraum). Der mögliche Umfang der Wasserstoffnutzung sollte in weiteren Forschungsprojekten erkundet werden, die die bessere energetische Effizienz der Wasserstoffnutzung abwägen gegen die Notwendigkeit, eine neue Infrastruktur für diesen Energieträger aufzubauen.

Abbildung 4:

Qualitative Darstellung des Energieflusses im UBA THGN D 2050 Szenario^{I,II}



I Inklusiv des Bedarfs an regenerativen Einsatzstoffen für die chemische Industrie.
 II Die Darstellungen der Energieströme sind proportional zu den notwendigen Energieströmen.
 III einschließlich Leitungsverluste, der Verluste aus der Methan-Rückverstromung und der Verluste der Biomassennutzung und Strombereitstellung)

Quelle: Umweltbundesamt, 2013

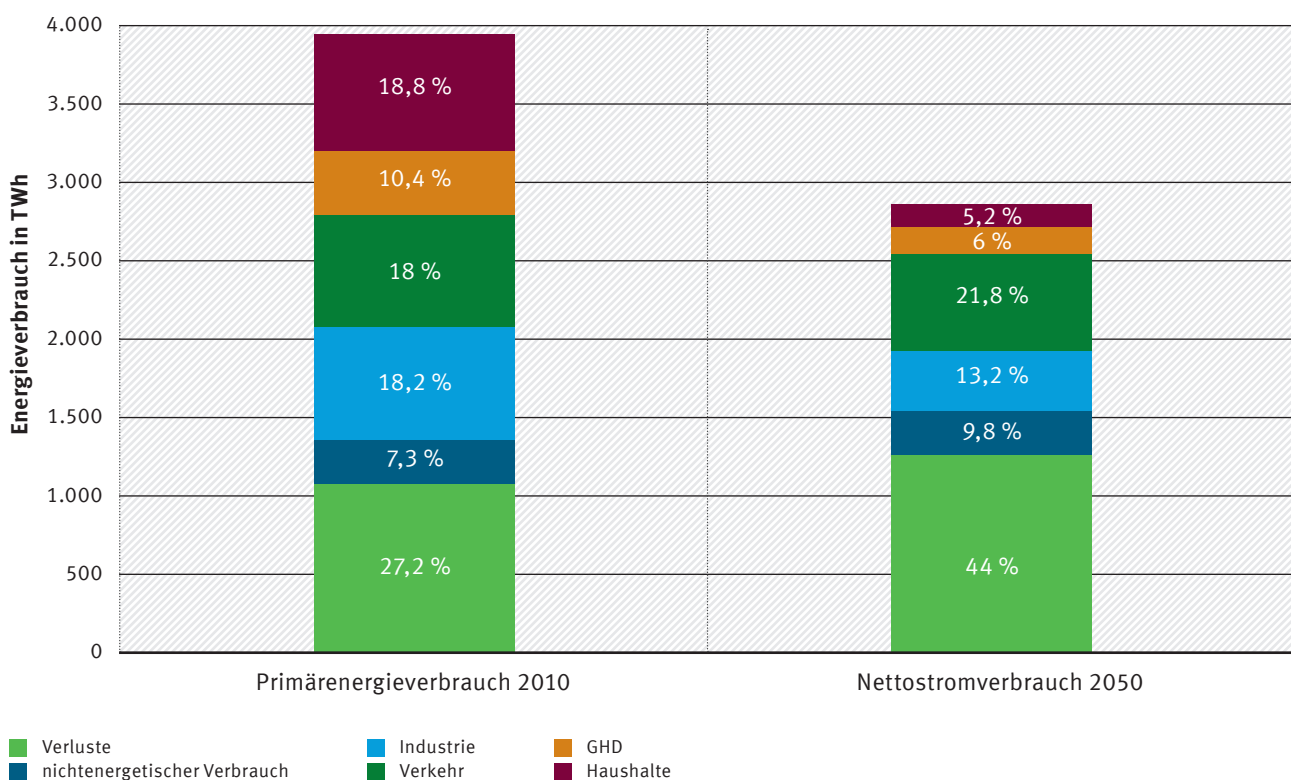
Wir gehen davon aus, dass im Jahr 2050 der direkt als Endenergie genutzte Strom (466 TWh/Jahr) vor allem im Inland produziert wird. Die technischen Potenziale den gesamten Strombedarf (rund 3.000 TWh/Jahr) national zu erzeugen, sind zwar vorhanden, da aber zum Beispiel aus ökologischen oder ökonomischen Gründen nur ein Teil dieser Potenziale sinnvoll genutzt werden kann, gehen wir davon aus, dass ein größerer Teil des in Deutschland benötigten Stroms im Ausland erzeugt werden würde. Dies wird zum einen voraussichtlich wirtschaftlicher sein, zum anderen können vor Ort die energetischen Verluste gemindert werden. Beim Transport der Energie, egal ob in Form von Strom, Methan oder Kraftstoffen, fallen ebenfalls energetische Verluste an, die ebenfalls die notwendige Erzeugungsleistung weiter erhöhen.

Eine dem heutigen Stand vergleichbare Importquote scheint realistisch.

Prinzipiell ist festzustellen, dass sich in einem regenerativen Energiesystem die Umwandlungsverluste bei der Bereitstellung von Brenn- und Kraftstoffen im Vergleich zum fossilen System erhöhen. Im Jahr 2010 betrug die statistischen Verluste^{VII} im Energiesystem rund 27 %. Unter den vorangestellten Annahmen würden sich in einem solchen regenerativen Energiesystem Verluste^{VIII} von etwa 44 %^{IX} ergeben. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass hier die Umwandlung eines endlichen fossilen Potenzials verglichen wird mit der Umwandlung eines erneuerbaren Potenzials.

Abbildung 5:

Sektoraler Energieverbrauch 2010 und im UBA THGND 2050 – Szenario



Quelle: Umweltbundesamt, 2013



Verkehr

Ein treibhausgasneutraler Verkehrssektor ist bis zum Jahr 2050 realisierbar. Die energiebedingten Emissionen des Verkehrs können auf nahezu Null reduziert werden. Diese ist möglich, wenn der Sektor vollständig auf erneuerbaren Strom umgestellt wird. Der Lösungsweg ist jedoch mit einem hohen zusätzlichen Strombedarf für Fahrstrom und stromerzeugte, synthetische Kraftstoffe verbunden. Es ist daher unumgänglich, den Endenergiebedarf des gesamten Verkehrssektors deutlich zu senken – trotz des prognostizierten Verkehrsanstiegs.

Damit ein treibhausgasneutraler Verkehrssektor realisiert werden kann, ist eine Vielzahl von Maßnahmen innerhalb und außerhalb des Verkehrssektors nötig. Einerseits müssen Anreize für technische Innovationen gesetzt werden, andererseits tragen auch über technische Lösungen hinausgehende Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung sowie Effizienzsteigerung wesentlich zur Lösung bei. Der Verkehrssektor kann seinen Endenergiebedarf nur durch einen Mix aus allen drei genannten Bereichen deutlich senken.

Verkehrsvermeidung ist die direkteste Möglichkeit um den Endenergiebedarf zu reduzieren. Verkehr zu vermeiden und Mobilität zu ermöglichen, müssen dabei nicht notwendigerweise gegensätzliche Ziele sein. Ein Beispiel hierfür sind Siedlungsstrukturen, die Arbeiten, Einkaufen und Freizeit im Nahraum zusammenbringen und dadurch Wege verkürzen: Der Verkehr ist geringer – die Mobilität ist hoch.

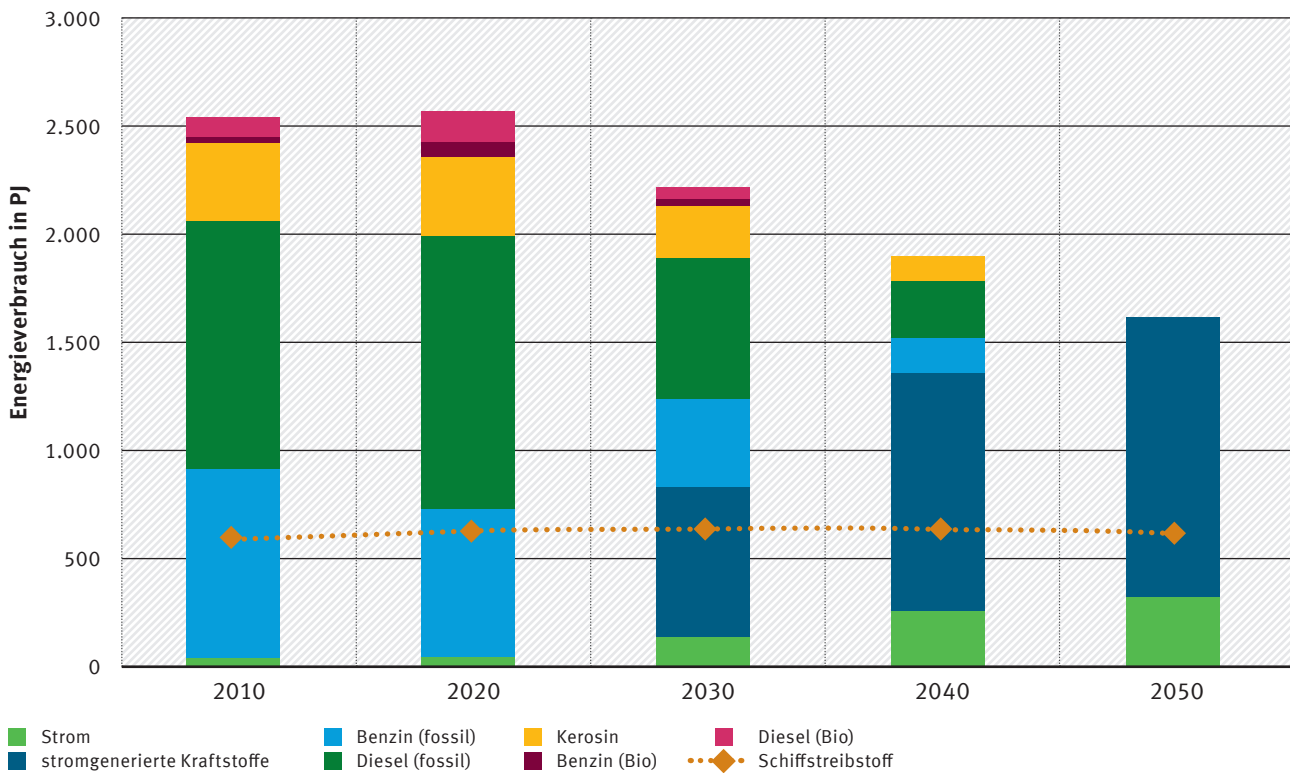
Verkehrsverlagerung auf umweltgerechte Verkehrsträger ist ein weiterer wichtiger Baustein eines energieeffizienten Verkehrssektors. Den motorisierten Individualverkehr (MIV) auf den Umweltverbund (Fahrrad/Fuß/Bus & Bahn/Car-Sharing) oder den Güterverkehr von der Straße auf die Schiene oder Wasserstraße zu verlagern trägt in hohem Maße dazu bei, den Endenergiebedarf zu senken.

Der dritte Baustein ist die *Effizienzsteigerung* der eingesetzten Fahrzeuge.

Als vierte Komponente kommt der Einsatz von nahezu CO₂-freien Kraftstoffen ins Spiel.

In unserem Szenario für einen treibhausgasneutralen

Abbildung 6:

Endenergiebedarf nach Energieträgern im Verkehr im UBA THGND 2050 – Szenario¹²

Quelle: Blanck et al. (2013)

Verkehr liegt der Endenergiebedarf des Verkehrssektors bei 2.248 PJ bzw. 624 TWh^x (inkl. Seeschifffahrt) und damit um rund ein Viertel unter dem Endenergiebedarf des Trends – also ohne Umsetzung zusätzlicher Maßnahmen. Wesentliche Gründe hierfür sind neben der etwas geringeren Verkehrsleistung und der Verlagerung zu energieärmeren Verkehrsträgern vor allem der höhere Anteil von elektrisch betriebenen Fahrzeugen im Straßenverkehr.

Im dargestellten Szenario beträgt der Anteil der stromerzeugten Kraftstoffe über 80 %. Bei der Berechnung des Strombedarfs für die Kraftstoffherzeugung wurde davon ausgegangen, dass alle Kraftstoffe über die PtL-Technik erzeugt werden. Es muss hervorgehoben werden, dass es sich um eines von einer ganzen Reihe möglicher Szenarien handelt. Die Strombedarfsrechnung stellt in dem vorgestellten Szenario gezielt die Obergrenze des notwendigen Bedarfes dar und markiert einen Extrempunkt im Lösungsraum. Es bedarf einer umfassenden Analyse, ob und wenn ja, in welcher Form strombasierte Kraftstoffe für die einzelnen Verkehrsträger bereitgestellt werden sollen. Nur 20 % des Stroms finden direkten Einsatz (ohne Seeschifffahrt, siehe Abbildung 6). Dies liegt vor al-

lem daran, dass zwar bei den Pkw bis zum Jahr 2050 57 % der Fahrleistung elektrisch erbracht werden, die Restriktionen beim Schwerlastverkehr sowie der Einsatz von stromgenerierten Kraftstoffen bei den übrigen Verkehrsmitteln (insbesondere bei Flugzeugen) aber zu einem hohen Anteil von Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben führen.

Gegenüber dem direkten Einsatz von Strom in Elektrofahrzeugen gibt es jedoch Umwandlungsverluste wenn stromgenerierte Kraftstoffe erzeugt werden. Der gesamte Strombedarf (Nettostromerzeugung) des Verkehrssektors – einschließlich dieser Umwandlungsverluste – liegt daher deutlich höher. Unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz je gefahrenen Kilometer ist es daher zu bevorzugen, Strom in Elektrofahrzeugen direkt einzusetzen. Demgegenüber bestehen die Vorteile der stromerzeugten Kraftstoffe in der Möglichkeit der Stromspeicherung sowie darin, sie in nicht für die Elektrifizierung geeigneten Bereichen des Verkehrssektors einzusetzen.

Das entwickelte Szenario mit dem Fokus auf strombasierten Kraftstoffen zeigt, dass sich die Menge des benötigten Stroms trotz zurückgehendem Endener-

giebedarf deutlich erhöht. Nur unter der Voraussetzung der ausreichenden Verfügbarkeit von Strom aus erneuerbaren Energien ist ein treibhausgasneutraler Verkehrssektor realisierbar.

Industrie

Die Ergebnisse zeigen in ihrer Summe, dass sich ein treibhausgasneutraler und energieeffizienter Industriesektor in Deutschland im Jahre 2050 entwickeln kann, wenn die für diese Studie zugrunde gelegten Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen können durch den Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom, Wasserstoff und Methan vollständig vermieden werden. Die prozess- bzw. rohstoffbedingten Emissionen können ebenfalls erheblich gesenkt werden und liegen im Jahr 2050 noch bei 14 Mio. t CO_{2Äq}. Die größten Emittenten sind dann die Zementindustrie mit 6,3 Mio. t CO_{2Äq}, die Kalkindustrie mit 3,5 Mio. t CO_{2Äq} und die Glasindustrie mit 0,8 Mio. t CO_{2Äq}.

Die Struktur des Industriesektors ist nach der Annahme im Szenario im Jahre 2050 im Wesentlichen mit der aktuellen Struktur vergleichbar. Neue, sich möglicherweise künftig entwickelnde Branchen werden im Bericht nicht betrachtet.

Die Auswahl der im Szenario betrachteten Branchen erfolgte auf Basis des Endenergieverbrauchs (EEV) der Industrie nach Wirtschaftszweigen und Branchen wie in der UBA-Publikation „Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008 (Auswertung für das Jahr 2008)“ dargestellt.⁵ Ziel war es dabei, die im Hinblick auf den industriellen EEV tatsächlich relevanten Branchen zu berücksichtigen.

Die international vereinbarte NIR-Systematik zur Darstellung der THG-Emissionen entspricht nicht der Systematik der Branchenstruktur des Industriesektors in Deutschland. Folglich mussten für die Bestimmung des Energieverbrauchs im Ausgangsjahr 2010 Branchendaten aus alternativen Quellen genutzt werden. Die hier zugrunde gelegten Energie- und Emissionsdaten sind folglich mit dem NIR nicht kompatibel. Wegen des Fehlens verwertbarer Branchendaten für 1990 ist deshalb auch ein Bezug der THG-Minderungen zum Jahr 1990 in diesem Kapitel nicht möglich.

Um regenerativ erzeugte Energieträger sowie regenerativen Strom einsetzen zu können, ist es in vielen

Branchen nötig, die Herstellungsprozesse grundsätzlich umzustellen und geeignete Anlagentechniken einzusetzen. Beispielsweise gehen wir in der Studie davon aus, dass es in der Stahlindustrie keine Primärstahlerzeugung über die Hochofen-Oxygenstahl-Route mehr gibt. Dafür wird die Elektrostahlerzeugung mittels Schrott und Schwammeisen (DRI) massiv ausgebaut. Als Energieträger für die Direktreduktion dient dann ausschließlich regenerativ erzeugtes Methangas und für die Elektrolichtbogenöfen sowie die Walzwerksöfen kommt ausschließlich regenerativer Strom zum Einsatz.

Obwohl in vielen Bereichen bis 2050 Produktionssteigerungen erwartet werden, zeigt die Studie, dass der gesamte Endenergieverbrauch im Vergleich zum Bezugsjahr 2010 zukünftig mit rund 373 TWh/a um ca. 50 % geringer sein wird. Damit verringert sich der spezifische Energieeinsatz je Tonne Produkt in zahlreichen Branchen im Mittel um den Faktor 2 bis 4. Dies wird in vielen Fällen erreicht, indem Fertigungsprozesse im Hinblick auf Material- und Energieeffizienz optimiert werden, die Abwärme konsequent genutzt und hocheffiziente Anlagentechnik eingesetzt wird. Dabei geht das Szenario von zahlreichen Technikinnovationen im Laufe der nächsten vier Jahrzehnte aus.

Hauptenergieträger im Jahr 2050 sind mit einem Anteil am gesamten industriellen Endenergieverbrauch von rund 50 % (199 TWh/a) regenerativ erzeugtes Methan und ca. 45 % (159 TWh/a) regenerativ erzeugter Strom (Tabelle 3). Entsprechend müssten in erheblich größerem Umfang als heute strombasierte Techniken eingesetzt werden. Dies würde auch weiteres Potenzial für die Teilnahme am Regelenergiemarkt bedeuten und die Flexibilität im Strommarkt erhöhen.

Im Bereich der Chemischen Industrie sowie der Stahlindustrie wäre anstelle des regenerativ erzeugten Methans regenerativ erzeugter Wasserstoff einsetzbar – sowohl als Energieträger als auch als Reduktionsmittel. Ein breiter Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff im gesamten Industriesektor wäre hingegen nur nach umfangreichen infrastrukturellen Veränderungen (z. B. Errichtung eines deutschlandweiten Wasserstoffnetzes) sowie prozesstechnischen Neu- und Weiterentwicklungen in den einzelnen Branchen möglich. Bei der Verwendung von regenerativ erzeugtem Methan kann hingegen die Infrastruk-

Tabelle 3

Energiedaten des Industriesektors und des Bereichs Verarbeitendes Gewerbe im UBA THG-ND 2050 – Szenario

	gesamter EEV in TWh/a	regeneratives Methan in TWh/a	regenerativer Strom in TWh/a	Nutzung interner biogener Restströme in TWh/a	Änderung des ges. EEV gegenüber 2010 in %
Stahlindustrie ^I	104,7	66,7	38,0		-42,19
NE-Metallindustrie	16,5	6,3	10,2		-35,29
Gießereiindustrie	6,5	1	5,5		-49,31
Chemische Industrie ^{II}	81,0	bis 61,0	20,0		-55,49
Zementindustrie	15,4	11	4,4		-44,78
Glasiindustrie	4,8	0	4,8		-81,31
Kalkindustrie	4,7	4,3	0,4		-43,27
Papier- und Zellstoffindustrie	37,6	16,6	5,9	15,1	-48,15
Nahrungsmittelindustrie	37,4	0	37,4		-32,97
Textilindustrie	4,3	1,8	2,5		-49,82
sonstige Branchen (nicht im Bericht betrachtet) ^{III}	60,2	30,1	30,1		
Summe	373,1	198,8	159,2^{IV}	15,1	

I Es wird angenommen, dass es technisch möglich sein wird, einen großen Teil des Bedarfs an regenerativem Methan auch mit dem energetisch günstigeren, regenerativ erzeugten Wasserstoff zu decken.

II Methan und Wasserstoff können gleichrangig eingesetzt werden, sodass ihre Summe 61 TWh/a ergibt. Dem Bereich liegt die Annahme zugrunde, dass bei einer jährlichen Minderung von 1,5 %/a von heute bis 2050 über alle Energieträger für Methan/Wasserstoff 61 TWh und für Strom 20 TWh entfallen. Zusätzlich werden 282 TWh Methan als regenerativer Rohstoff bzw. als Kohlenstoffquelle in der chemischen Synthese benötigt.

III Für die sonstigen Branchen, die nicht im Bericht betrachtet wurden, wurde im Mittel angenommen, den gesamten EEV um 50 % gegenüber 2010 zu verringern, sowie eine 50 zu 50-Verteilung von regenerativ erzeugtem Methan zu regenerativ erzeugtem Strom in 2050.

IV Ohne Strombedarf für RaumwärmeverSORGUNG und Informations- und Kommunikationstechnik

Quelle: Umweltbundesamt 2013

tur des bereits vorhandenen Erdgasnetzes verwendet werden und der Grad der technischen Anpassungen wird insgesamt als deutlich geringer eingeschätzt. Daher wird auf Basis einer konservativen Schätzung des Energiebedarfs innerhalb des entwickelten Szenarios für den gesamten Industriesektor ausschließlich der Einsatz von regenerativ erzeugtem Methan betrachtet.

Daneben werden in der Papierindustrie etwa 15 TWh/a in Form von produktionsbedingten Bioreststoffen (Lignin usw.) eingesetzt.

Zusätzlich gehen wir davon aus, dass zukünftig 282 TWh/a regenerativ erzeugtes Methan in der Chemischen Industrie als Kohlenstoffquelle in der chemischen Synthese eingesetzt wird. Auf diese Weise werden auch die prozessbedingten Treibhausgasemissionen in vielen Bereichen der Chemischen Industrie, beispielsweise bei der Ammoniakherstellung, vollständig vermieden.

Im gesamten Industriesektor ergibt sich für 2050 eine Reduzierung der prozessbedingten Treibhausgasemissionen auf rund 14 Mio. t im Jahr und somit um rund 75 % im Vergleich zu 2010 (Tabelle 4). Die Einsparung kann vor allem durch Produktumstellungen – wie in der Zementindustrie –, sowie der Nutzung regenerativ erzeugter Rohstoffe für die Chemische Industrie erreicht werden. Die Substitution von F-Gasen ist in vielen Bereichen schon heute technisch möglich, wird aber noch nicht in ausreichendem Maße vollzogen. Würden bis zum Jahr 2050 alle heute technisch möglichen Maßnahmen umgesetzt werden, könnten die F-Gas-Emissionen um 92 % gesenkt werden, auf ein Minimum von 1,204 Mio. t CO_{2Äq} im Jahr 2050. Durch produkt- und prozessbezogene Maßnahmen, den Einsatz von Lösemitteln aus nachwachsenden Rohstoffen und eine Effizienzsteigerung beim Lösemittelleinsatz können die Emissionen von NMVOC auf 0,765 Mio. t CO_{2Äq} bis 2050 reduziert werden. Für die Emissionen aus dem Lachgaseinsatz nehmen wir an, dass sie durch den Verzicht in der Anästhesie automatisch auf 0,031 Mio. t CO_{2Äq} zurück gehen werden.

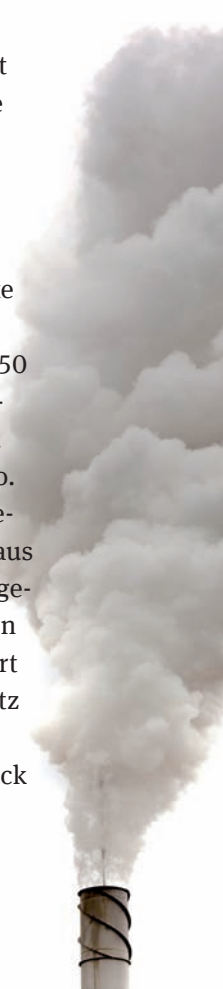


Tabelle 4

Treibhausgasemissionen des Industriesektors und des Bereichs Verarbeitendes Gewerbe im UBA THGND 2050 – Szenario

Treibhausgasemissionen (THG-EM) in t CO ₂ Äq/a			
	energiebedingte	prozessbedingte	Änderung Gesamtemissionen gegenüber 2010 in %
Stahlindustrie ^I		162.000	-99,7
NE-Metallindustrie		0	-100,0
Gießereiindustrie		0	-100,0
chemische Industrie ^{II}		500.000	-98,7
Zementindustrie ^{III}		6.330.000	-79,8
Glasindustrie		761.563	-94,1
Kalkindustrie ^{IV}		3.530.000	-64,8
Papier- und Zellstoffindustrie		0	-100
Nahrungsmittelindustrie		0	-100
Textilindustrie		0	-100
Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase			
Aluminium- und Magnesiumindustrie		283.000	8,0
Produktion fluorierter Treibhausgase		300.000	17,2
Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen		28.000	-99,7
Herstellung von Dämmstoffen		69.000	-89,7
Feuerlöschmittel		0	-100,0
Aerosole und Lösemittel		100.000	-78,2
Halbleiterproduktion		109.000	-26,4
Elektrische Betriebsmittel		65.000	-88,0
Sonstige SF6-Anwendungen		250.000	-90,6
Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktverwendungen			
Anwendung von Farben und Lacken		255.310	-55,4
Entfettung sowie Chemische Reinigung		47.785	-42,1
Herstellung und Anwendung chemischer Produkte		70.938	-42,4
Andere Anwendungen von Lösemitteln		390.824	-51,4
sonstige Branchen (nicht im Bericht betrachtet)	0		
Summe	0	13.783.420^V	

I CO₂-Emissionen entstehen nur durch den Abbrand der Graphitelektroden im Elektrolichtbogenofen.

II Prozessbedingte Treibhausgasemissionen entstehen nur noch als N₂O in der Adipinsäure- u. Salpetersäureproduktion, da 2050 ausschließlich Kohlenstoffquellen in der chemischen Synthese verwendet werden, die auf regenerativem Methan basieren.

III Unter der Annahme, dass im Vergleich zum Jahr 2010 durch die neuen Produktionsverfahren und Produkte die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen der Zementproduktion um 80 % gesenkt werden können, entstehen im Jahr 2050 noch etwa 2.500 kt CO₂ aus der Entsäuerung von Rohmaterialien.

IV Die Rohstoff- und damit prozessbedingten CO₂-Emissionen reduzieren sich aufgrund des Produktionsrückgangs um 30 % bis 2050.

V Inklusiv 31.000 t CO₂Äq aus Lachgaseinsatz.

Quelle: Umweltbundesamt 2013

Abfall und Abwasser

Zwischen 1990 und 2010 sind die Emissionen im Sektor Abfall und Abwasser bereits erheblich zurückgegangen. Langfristig werden die Emissionen weiter sinken und 2050 rund 3 Mio. t CO_{2Äq} betragen. Das entspricht einer Minderung um mehr als 90 % gegenüber 1990.

Indem Wertstoffe verstärkt aus dem Restabfall abgetrennt und die deponierten Siedlungsabfallmengen, die bereits heute vor der Ablagerung thermisch oder mechanisch-biologisch behandelt werden müssen, auf diese Weise deutlich reduziert werden, haben die Methanemissionen aus Deponien bis heute bereits deutlich abgenommen. Die Treibhausgasemissionen aus Deponien sanken von etwa 38 Mio. t CO_{2Äq} im Jahr 1990 auf 9 Mio. t CO_{2Äq} im Jahr 2010. Dieser Trend wird sich fortsetzen.

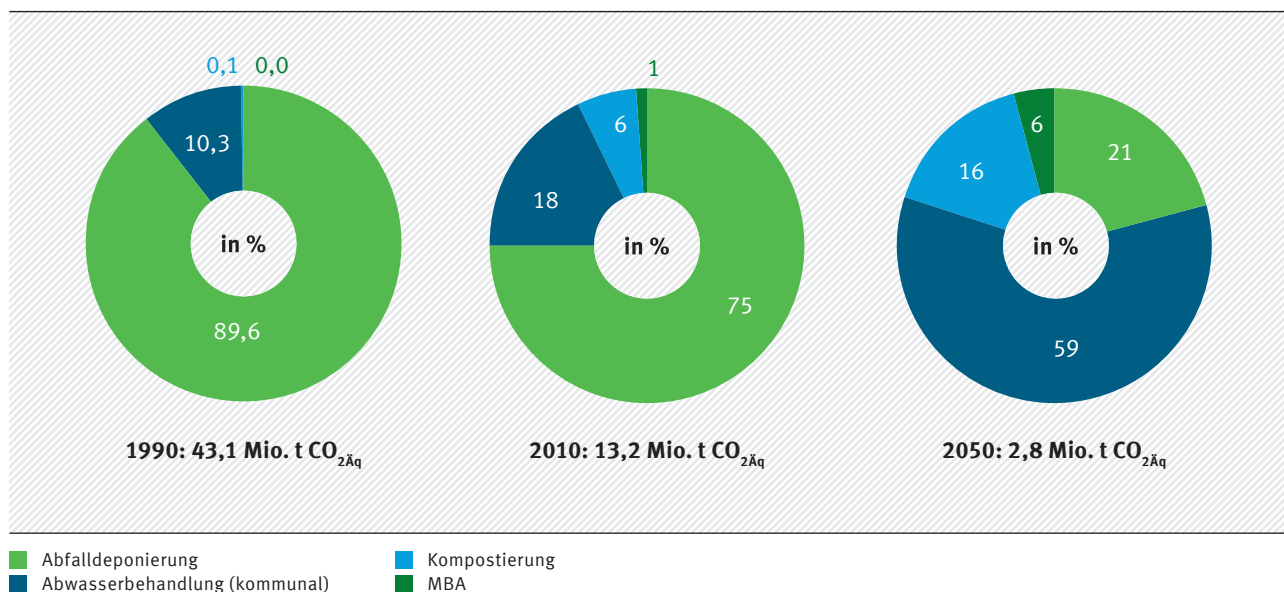
Bedingt durch die geringen Mengen der auf Deponien abzulagernden Restabfälle und die sinkende Gasbildung der vor 2005 unbehandelt abgelagerten Abfälle, verringert sich die jährliche Methanbildung nach

unseren Schätzungen auf insgesamt etwa 56.000 t (diese Summe entspricht 1,2 Mio. t CO_{2Äq}) im Jahr 2050. Darin enthalten sind auch der für die kommenden Jahre angenommene Deponierückbau und der Einsatz aerober Stabilisierungsverfahren. Die genannte Methanmenge wird jedoch nicht vollständig in die Atmosphäre emittiert. Wir gehen davon aus, dass sich durch die Fassung von Deponiegas und durch biologische Oxidation die Emissionen gegenüber dem gebildeten Methan um weitere 50 % verringern. Die für 2050 zu erwartenden Methanemissionen aus Deponien reduzieren sich demnach insgesamt auf 28.000 t Methan. Die Treibhausgasemissionen aus Deponien sinken damit voraussichtlich von 9 Mio. t CO_{2Äq} im Jahr 2010 auf etwa 0,6 Mio. t CO_{2Äq} im Jahr 2050.

Damit sinkt der Anteil des Methans aus Deponien an den gesamten Treibhausgasemissionen dieses Sektors von 90 % im Jahr 1990 bis 2050 auf etwa 20 Prozent. Dagegen nimmt der Anteil der Emissionen aus dem Bereich Abwasser von ca. 10 Prozent auf etwa 60 Prozent zu, obwohl auch hier die absoluten Emissionen von 4,44 Mio. t CO_{2Äq} im Jahr 1990 auf 1,65 Mio. t CO_{2Äq} abnehmen werden.

Abbildung 7:

Veränderung der Treibhausgasemissionen im Abfall- und Abwassersektor 1990-2050 im UBA THGND 2050 – Szenario



Quelle: Umweltbundesamt, auf Basis des NIR 2012⁶, 2013

Die Ausweitung der getrennten Bioabfallsammlung führt voraussichtlich dazu, dass die in Kompostierungs- und Vergärungsanlagen zu behandelnden Abfälle um mehr als 30 % steigen. Da die Treibhausgasemissionen im Anlagenbetrieb reduziert werden, gehen wir trotz steigender Einsatzmengen davon aus, dass sich die Emissionen aus der Bioabfallbehandlung bis 2050 um etwa ein Drittel reduzieren lassen.

Für die in MBA behandelten Abfallmengen wird für 2050 davon ausgegangen, dass diese gegenüber 2010 konstant bleiben. Durch Umrüstungen der MBA zu Mechanisch-Biologischen Stabilisierungsanlagen (MBS) lassen sich die Emission um 40 % auf etwa 100.000 t CO_{2Äq} senken. Außerdem verringert sich die Menge der abgelagerten Behandlungsrückstände, denn im Behandlungsprozess der MBS wird ein deutlich höherer Anteil der behandelten Abfälle einer thermischen oder stofflichen Nutzung zugeführt.

Desweiteren nehmen wir an, dass die Anteile an Produkten, die auf Erdölbasis produziert wurden, bis zum Jahr 2050 zum großen Teil schon als Abfall entsorgt wurden. Unter diesen Voraussetzungen sind

die Kohlendioxidemissionen fossilen Ursprungs aus Abfallverbrennungsanlagen im Jahr 2050 zu vernachlässigen.

Auch bei der Abwasserbehandlung ist langfristig mit Emissionsminderungen zu rechnen. Da der Anschlussgrad der Bevölkerung an die zentrale Abwasserbehandlung sich erhöht und die Bevölkerung im ländlichen Raum zurückgeht, sinken die Methanemissionen aus abflusslosen Gruben auf etwa 35.000 t CO_{2Äq}.

Die Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung verringern sich nach unseren Annahmen auf gut 1,6 Mio. t CO_{2Äq}. Voraussetzung hierfür ist, dass sich die Bevölkerung in Deutschland deutlich proteinärmer ernährt (d.h. weniger Fleisch isst) und sich damit den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung annähert. Unter den vorgenannten Annahmen ist davon auszugehen, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen aus der Abwasserbehandlung ca. 1,65 Mio. t CO_{2Äq} betragen.





Landwirtschaft

In den Szenarien für den deutschen Agrarsektor sollen die jährlichen Treibhausgasemissionen aus der Quellgruppe Landwirtschaft auf 35 Mio. t CO_{2Äq} gesenkt werden.

Dafür wird die Kombination aus Klimaschutzmaßnahmen im technischen Bereich (mehr Effizienz), geänderten Produktionssystemen und eingeschränkter Tierhaltung betrachtet. Durch technische Klimaschutzmaßnahmen ohne Produktionseinschränkungen ist es möglich, die Emissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft auf 45 bis 47 Mio. t CO_{2Äq} zu vermindern (Minderung von 20–25 %). Wichtige Maßnahmen sind dabei, die Stickstoff (N)-Ausnutzung konsequent zu steigern und den anfallenden Wirtschaftsdünger (Gülle u.a.) in Biogasanlagen mit gasdichter Lagerung der Gärreste^{XI} einzusetzen. Weitere Treibhausgasreduzierungen können darüber hinaus nur erzielt werden, wenn die Tierproduktion eingeschränkt wird – dies betrifft vor allem die Wiederkäuer aufgrund ihrer hohen verdauungsbedingten Methanemissionen.

Für das Jahr 2050 wurden für den Sektor Landwirtschaft^{XII} zwei Szenarien betrachtet: ein Szenario mit einer Fortschreibung der bestehenden Strukturen der deutschen Landwirtschaft (Szenario konv) und ein

Szenario, das entsprechend den Zielen der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (2002) annimmt, dass der ökologische Landbau auf 20 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche ausgedehnt wird.

Für beide Szenarien gelten – zusätzlich zu den allgemeinen in der Einleitung genannten Annahmen – folgende Annahmen und Voraussetzungen:

- ▶ Im Jahr 2050 wird in Deutschland keine Biomasse mehr eigens für die energetische Nutzung angebaut (siehe Absatz Energie). Energetisch genutzt werden lediglich Rest- und Abfallstoffe aus der Pflanzen- und Tierproduktion (z. B. Gülle oder Mist sowie überschüssiges Stroh, Landschaftspflegeschnitt etc.).
- ▶ Nachwachsende Rohstoffe werden weiterhin wie im Umfang des Jahres 2007 stofflich verwendet.
- ▶ Um die durch Landnutzung bedingten Treibhausgasemissionen zu minimieren, ist es erforderlich, die Umwandlung von Grünlandflächen in Ackerland einzustellen und den größten Teil der landwirtschaftlich genutzten Moorflächen (etwa 6 % der heutigen landwirtschaftlich genutzten Flächen) aus der Bewirtschaftung zu nehmen und wieder zu vernässen. Die verbleibenden Emissionen aus Moorböden sind im Sektor LULUCF erfasst.
- ▶ Annahmen zur Flächenversiegelung finden sich im Kapitel LULUCF.

Tabelle 5

Maßnahmen zur THG-Minderung in der Landwirtschaft in den Szenarien für das Jahr 2050⁷

	N ₂ O	CH ₄	THG gesamt	Minderung je Schritt
	in Mio. t CO _{2Äq}			
Szenario 1: konventionelle Landwirtschaft (KONV)				
Ausgangssituation 2050 nach Fortschreibung	37,2	22,6	59,8	
N-Produktivität gesteigert ¹	30,7	22,6	53,3	-6,5
80 % des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen	29,1	18,5	47,6	-5,7
Milchvieh-Umtriebsrate niedriger (von 0,28 auf 0,2), mehr Kälbermast	29,0	17,9	46,9	-0,7
Keine Mutterkühe, Schafe minus 50 %	28,9	14,6	43,5	-3,4
Keine Bullen- und Färsenmast	28,5	12,7	41,2	-2,3
Milchkuhbestand minus 38 %	27,9	8,4	36,3	-4,9
Schweinebestand minus 55 %	27,2	7,8	35,0	-1,3
Szenario 2: ökologischer Landbau auf 20 % der LF (Öko-20%)				
a) Ökologischer Landbau auf 20 % der LF ...				
Ausgangssituation 2050 nach Fortschreibung	3,4	3,4	6,8	
N-Produktivität gesteigert (von 50 auf 60 % Ausnutzung)	3,4	3,4	6,8	0,0
80 % des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen	3,1	3,0	6,1	-0,7
Keine Mutterkühe, Schafe minus 50 %	2,9	2,5	5,4	-0,7
Keine Bullen- und Färsenmast	2,8	2,0	4,8	-0,6
b) ... und konventioneller Landbau auf 80 % der LF				
Ausgangssituation 2050 nach Fortschreibung	31,0	18,7	49,7	
N-Produktivität gesteigert ¹	25,6	18,7	44,2	-5,4
80 % des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen	24,2	15,2	39,4	-4,8
Milchvieh-Umtriebsrate niedriger (von 0,28 auf 0,2), mehr Kälbermast	24,1	14,6	38,8	-0,6
Keine Mutterkühe, Schafe minus 50 %	24,0	13,2	37,2	-1,5
Keine Bullen- und Färsenmast	23,8	10,5	34,2	-3,0
Milchkuhbestand minus 38 %	23,5	7,0	30,5	-3,8
Schweinebestand minus 11 %	23,3	6,9	30,2	-0,3

¹ Ausnutzung Mineraldünger-N von 80 % auf 90 %; organischer N von 26 % auf 60 %; legume N-Fixierung von 20 % auf 40 %.

Quelle: Osterburg et al. (2013)

Die beiden Szenarien (1) konventionell und (2) 20 % Ökolandbaufläche in Deutschland, unterscheiden sich hinsichtlich der Produktions- und Versorgungsleistung der deutschen Landwirtschaft, bei gleichen

Emissionen in Höhe von 35 Mio. t CO_{2Äq} pro Jahr aus der Landwirtschaft. Dabei werden internationale Handelseffekte jedoch nicht berücksichtigt.

Im Szenario KONV wird der Weizenanbau trotz ver-ringerter Ackerfläche gegenüber dem Ausgangsjahr 2007 ausgedehnt, der Getreideanteil an der Ackerflä- che steigt dadurch auf über 70 %. Durch den Abbau der Rinderbestände wird vor allem der Ackerfutter- bau eingeschränkt (Silomais, Klee- und Feldgras). Der Tierbestand geht auf etwa 40 % des Bestands von 2007 zurück – vor allem werden die Rinder-, Schwe- ine- und Schafbestände verringert, während der Geflügel- und Pferdebestand aufrechterhalten wird. Aufgrund der angenommenen Leistungssteigerung bei Milchkühen geht die Milchproduktion weniger stark zurück als die Fleischproduktion.

Im Szenario ÖKO-20 % ist die Flächennutzung auf der konventionell bewirtschafteten Fläche ähnlich wie im Szenario KONV. Der Rinder- und Schweinebestand muss aber weniger stark verringert werden, um die Treibhausgase wie erforderlich zu mindern. Auf der

ökologisch bewirtschafteten Ackerfläche werden die Roggen-, Hülsenfrucht- und Klee grasflächen deutlich ausgedehnt, die Weizen- und Rapsflächen werden dagegen eingeschränkt. Die Schweine- und Geflügel- haltung spielt im Jahr 2050 im ökologischen Landbau nur eine sehr geringe Rolle.

Wird die Tierproduktion eingeschränkt, ohne dass zugleich der Nahrungsverbrauch in Deutschland angepasst wird, hätte dies allerdings nur verringerte THG-Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft zur Folge. Da in diesem Fall ausländische Anbieter die Versorgung übernehmen, würde global gesehen der Klimaschutzeffekt durch Tierbestandsaufstockun- gen außerhalb von Deutschland wieder kompensiert. Dies ist ein Beispiel für sogenannte „Leakage“-Effekte – das heißt die Emissionen werden in andere Länder verlagert. Neben den Annahmen zur Veränderung von Landnutzung und Agrarproduktion werden

Tabelle 6

Produktionsmengen im Ausgangsjahr 2007 und in den Szenarien für das Jahr 2050⁸

	Ausgangsjahr	KONV	ÖKO-20 %	davon 80 % konv	davon 20 % öko
	2007	2050	2050		
in Mio. t					
Getreide insgesamt	45,0	65,1	56,7	54,1	2,5
Weizen	23,0	41,6	34,6	33,6	0,9
Roggen	3,0	3,4	3,0	2,3	0,7
Gerste	11,4	12,4	11,8	11,8	0,0
Hafer	0,8	0,8	0,6	0,3	0,4
Körnermais	4,1	4,5	4,5	4,4	0,1
sonst. Getreide	2,2	2,4	2,1	1,8	0,4
Hülsenfrüchte	0,3	0,4	1,4	0,6	0,8
Raps, Ölsaaten	5,3	6,4	6,3	6,0	0,3
Kartoffeln	11,0	11,2	10,5	9,1	1,5
Zuckerrüben	23,3	28,0	27,7	24,4	3,3
Gemüse	3,2	2,9	2,6	1,8	0,8
Obst	1,3	1,2	1,2	0,9	0,3
Weinmost	0,8	0,8	0,7	0,6	0,1
Milch	28,1	17,4	18,3	14,3	4,0
Fleisch insgesamt	6,4	2,9	4,8	4,6	0,2
Rindfleisch	1,1	0,3	0,3	0,3	0,1
Schweinefleisch	4,0	1,4	3,3	3,2	0,1
Schaffleisch	0,04	0,02	0,02	0,02	0,00
Geflügelfleisch	1,0	1,1	1,0	0,9	0,0
Eier	0,8	0,9	0,8	0,8	0,1

Quelle: Osterburg et al. (2013)

deshalb auch Annahmen zur Veränderung der Ernährung getroffen. Die Annahmen zum Nahrungsverbrauch orientieren sich an den Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE). Im Wesentlichen empfiehlt diese, im Vergleich zu heute deutlich weniger Fleisch und stattdessen mehr Gemüse zu essen. Ein hoher Fleischkonsum wird mit einem erhöhten Risiko für die Gesundheit in Verbindung gebracht. Dies wird auf den hohen Fettgehalt mit gesättigten Fettsäuren und Cholesterin, sowie auf die Zubereitungsarten wie Räuchern, Braten, Grillen und Salzen zurückgeführt. Zu betonen ist, dass die im Zusammenhang mit der Ernährung betrachteten Krankheitsbilder nicht von monokausaler Natur sind und die Ernährung nur ein Faktor von vielen ist.

Außerdem nehmen wir an, dass sich die Menge der Lebensmittelabfälle um die Hälfte verringern lässt.

Die genannten Veränderungen der heutigen Konsum- und Verhaltensmuster bei der Ernährung, in Verbindung mit dem Ende des Biomasseanbaus für die energetische Nutzung, schränken die Binnennachfrage nach Agrarprodukten deutlich ein. Gerade der Verbrauch von Nahrungsmitteln tierischer Herkunft beeinflusst erheblich den kumulierten Flächen- und Energieanspruch und die THG-Emissionen, die durch die Deckung des deutschen Nahrungsmittelbedarfs entstehen. Werden weniger tierische Produkte verbraucht und der Lebensmittelverderb verringert, schlägt sich dies jedoch nicht in demselben Ausmaß in einer veränderten Produktion des deutschen Agrarsektors nieder. In einer offenen Marktwirtschaft bestimmt das nationale Verbraucher- und Ernährungsverhalten nur mittelbar die Produktionsstruktur des Agrarsektors, da dieser in erheblichem Maße durch die Austauschbeziehungen an den internationalen Märkten beeinflusst wird.

Die Kombination von konventionellem und ökologischem Landbau auf 20% der Landwirtschaftsfläche zeigt, dass sich offensichtlich Synergien ergeben, die dazu beitragen, dass die landwirtschaftliche Produktion weniger stark eingeschränkt werden muss. Die Synergien sind mit der bevorzugten Nutzung des Grünlands als Fläche für die im ökologischen Landbau benötigte biologische N-Bindung durch Klee und andere Leguminosen zu erklären. Auf einem relevanten Teil der Grünlandfläche wird im Szenario ÖKO-20% kein N-Mineraldünger eingesetzt, dies senkt die N₂O-Emissionen und ist Voraussetzung für eine ver-

stärkte N-Bindung durch Klee. Über die Verfütterung kann der so gebundene Stickstoff schließlich in Form von Wirtschaftsdünger aus der Rinderhaltung im weiteren Verlauf im ökologischen Ackerbau eingesetzt werden. So müssen weniger Ackerflächen für Klee-gras oder andere Leguminosen reserviert werden. Im Szenario Öko-20% müssen die Tierbestände im Vergleich zum Szenario KONV weniger stark abgebaut werden, um das THG-Einsparungsziel zu erreichen.

Somit besteht ein Spielraum, die Landnutzungsin-tensität und damit die Produktionsmengen weiter zu reduzieren, beispielsweise durch eine weitgehende Umstellung auf Ökolandbau.

Ein höherer Flächenanteil des ökologischen Landbaus hat nach Auffassung des Umweltbundesamtes aber auch klare Vorteile hinsichtlich des Umweltschutzes, da im Ökolandbau zum Beispiel keine chemisch-synthetischen N-Mineraldünger- und Pestizide gegenüber dem Szenario mit konventionellem Landbau eingesetzt werden. Deshalb sollte aus Sicht des Umweltbundesamtes bis zum Jahr 2050 eine über das 20%-Ziel deutlich hinausgehende Ausdehnung des ökologischen Landbaus angestrebt werden. Eine vollständige Umstellung auf Ökolandbau ist sowohl quantitativ als auch hinsichtlich der Umweltwirkungen zu untersuchen und weiter zu entwickeln.

Landnutzung, Landnutzungsänderung, und Forstwirtschaft (LULUCF^{XIII})

Unter den unten beschriebenen Annahmen ergeben sich für das Jahr 2050 Emissionen von 8 Mio. t CO_{2Äq} für den Gesamtbereich (siehe Tabelle 7).

Der Sektor LULUCF betrachtet alle flächengebundenen Kohlenstoffspeicher, also flächengebundene Quellen oder Senken der Treibhausgasemissionen von Wald, Acker, Weide, Siedlungs- und Feuchtgebieten. Dies umfasst die Freisetzung von Treibhausgasen etwa durch Waldnutzung, Entwaldung oder Pflügen des Bodens bzw. Entzug des Kohlendioxids aus der Atmosphäre beispielsweise durch Aufforstung und Waldwuchs (Senke). Nicht in diesen Sektor fallen die im Abschnitt Landwirtschaft beschriebenen Emissionen, wie zum Beispiel Lachgasemissionen infolge von Düngung oder Methanemissionen aus der Tierhaltung.

Tabelle 7:

Treibhausgasemissionen im UBA THGND 2050 - Szenario für den Sektor LULUCF

Kategorie	Emissionen in Mio. t CO _{2Äq}
Landwirtschaftliche Böden	5,5 (Kalkung: 1,5 und Moorböden: 4)
Siedlung	2,5
Torfabbau	0
Wald	0
Gesamt	8

Quelle: Umweltbundesamt auf Basis Osterburg et al., (2013)

Dem Forstbereich liegt kein Szenario für 2050 zugrunde, dass die komplexen, sowohl ökologischen (natürliche und anthropogen beeinflusste Zyklen, Auswirkungen des Klimawandels, Berücksichtigung naturschutzfachlicher Ziele,) als auch ökonomischen Implikationen (Rohstofflieferant, Sicherung ökosystemarer Dienstleistungen) berücksichtigt.

Abgeleitet von den WEHAM Szenarien¹⁰ (WaldEntwicklungs- und HolzAufkommensModellierung) des Thünen Instituts, die entwickelt wurden um künftige Erntemengen abzuschätzen, halten wir es allerdings für plausibel und realistisch, den deutschen Waldsektor langfristig bei Nullnettoemissionen zu halten – das heißt, die Emissionen/Bindungen werden um den Nullwert pendeln. Voraussetzung ist allerdings, dass

eine nachhaltige Waldnutzung strikt befolgt wird. Nur so ist sichergestellt, dass dauerhaft nicht mehr Holz geerntet wird als nachwächst.

Das vom Thünen-Institut für Ländliche Räume ermittelte Einsparpotenzial von 37,1 Mio. t CO_{2Äq} bezieht sich auf 1,05 Mio. ha landwirtschaftlich genutzten Moorböden. 633.000 ha Grünland und 420.000 ha Ackerland auf Moorböden können aus der Nutzung genommen und restauriert werden.¹¹ Auf den verbleibenden 180.000 ha Ackerfläche ist aufgrund der räumlichen Nähe zu Siedlungen und Infrastruktur oder der irreversiblen Schädigung der Torfkörper keine Wiedervernässung möglich. Hier wird von einer Umwandlung zu extensiv bewirtschaftetem Grünland ausgegangen. Aus diesen Flächen werden auch zukünftig noch 4 Mio. t CO_{2Äq} emittiert werden. Da ab 2050 keine Flächen mehr in Ackerland umgewandelt werden, fallen keine Emissionen aus der Umwandlung von anders genutzten Flächen zu Ackerland an. Mit den für 2050 angenommenen 1,5 Mio. t CO₂-Emissionen aus landwirtschaftlicher Kalkung ergeben sich insgesamt Emissionen in Höhe von 5,5 Mio. t CO_{2Äq} aus landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Eine Einstellung des Torfabbaus und der – soweit möglich – weitestgehende Ersatz von gartenbaulichem Torf durch Alternativen wie Kokosfasern oder Terra Preta, bieten Minderungspotentiale von bis zu 2 Mio. t CO₂. Hier sollte darauf geachtet werden, dass durch ein Torfabbauverbot in Deutschland Emissionen ins Ausland verlagert werden können, sollte nicht zeitgleich ein Importverbot für Torf erlassen werden.

Für das Jahr 2050 wird keine zusätzliche Erweiterung der Siedlungs- und Verkehrsflächen angenommen: die Flächeninanspruchnahme fällt linear von 80 ha/Tag in 2007 auf 30 ha/Tag in 2020 (Bundesregierung (2002), um dann weiter linear auf den Zielwert Null in 2050 zu sinken. Die Treibhausgasemissionen der Siedlungsflächen von 2010 werden fortgeschrieben, für 2050 werden somit Emissionen in Höhe von 2,5 Mio. t CO₂ veranschlagt. Die Frage, inwieweit Siedlungsgrün als Kohlenstoffsенке wirken kann, lässt sich aufgrund fehlender Daten nicht beantworten. Der Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung

und Forstwirtschaft nimmt im Vergleich zu den anderen Sektoren eine spezielle Rolle ein. Die Gründe liegen in seiner potenziellen Senkenfunktion, den vorhandenen und zu schützenden großen natürlichen Speichern in Boden und Biomasse, der langsamen Wirksamkeit von Maßnahmen und seiner starken und direkten Abhängigkeit von natürlichen Einflüssen (u. a. vom Klima und dessen Änderungen). Darüber hinaus ändern Maßnahmen im LULUCF-Sektor nicht

nur die Treibhausgasemissionen und -bindungen, sondern greifen auch in die Lebensmittel- und Rohstoffversorgung ein, zudem beeinflussen sie aufgrund globaler Vernetzungen nicht nur nationale Gegebenheiten. Diese Umstände erschweren es, die Möglichkeiten, Potentiale und Entwicklungen der Treibhausgasemissionen und -bindungen im Bereich LULUCF, insbesondere für den Waldbereich abzuschätzen.

Überlegungen zu den Wechselwirkungen zwischen Ressourcenproduktivität und Treibhausgasvermeidung

Diese Studie konzentriert sich auf die Frage, wie im Jahr 2050 ein treibhausgasneutrales Deutschland aussehen könnte. Neben der dafür notwendigen Vermeidung von Treibhausgasemissionen hält es das Umweltbundesamt für grundsätzlich geboten, die Ressourcennutzung um 50 % bis 2020 und um 90 % bis 2050 zu senken. In dieser Studie konnte aber das Thema Ressourcenproduktivität aufgrund der hohen Komplexität nur exemplarisch berücksichtigt werden. Daher sollen hier einige Wechselwirkungen diskutiert werden.

Bei der Inanspruchnahme der natürlichen Ressourcen entstehen verschiedenartige Rohstoff- und Energieflüsse, Wasserverbräuche sowie Flächeninanspruchnahmen auf der Inputseite. Auf der Outputseite des Ressourcenverbrauchs steht dagegen die Nutzung von Ökosystemleistungen, wie die der Senkenfunktion von Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft) durch die Aufnahme von Schadstoffemissionen, darunter auch Klimagase.

Die Ressourceninanspruchnahme durch einen sparsamen und effizienten Einsatz von abiotischen Rohstoffen zu reduzieren, trägt unmittelbar dazu bei THG-Emissionen zu vermeiden und zu senken. Denn energieintensive Produkte bestehen häufig aus Metallen, werden aus Erdöl oder Industriemineralien gewonnen oder enthalten andere mineralische Rohstoffe wie Kies, Sand oder Steine. Werden als Ersatz Holzprodukte aus nachhaltiger Waldwirtschaft

eingesetzt, kann daraus ein wichtiger Beitrag zur Ressourcenschonung hervorgehen. Derartige Produkte werden verstärkt kaskadenartig genutzt, nach dem Produktleben werden sie also in anderen Produkten weiterverwendet. Holz ist bereits heute der mengenmäßig bedeutendste nachwachsende Rohstoff, der in Deutschland stofflich und energetisch genutzt wird. Es wird traditionell auf vielfältige Weise eingesetzt, ob als Bauholz, Möbel, Fensterrahmen, Transportpalette oder Papier und Pappe. Werden weitere traditionelle Nutzungen verstärkt wiederbelebt und innovative Produkte und Verfahren zur Holznutzung entwickelt, können zum Beispiel im Bausektor Konstruktionselemente aus Holz (tragende Rahmen, Bekleidungen, Platten, Treppen, Fensterrahmen) Stahl, Beton, Gips und Kunststoff zunehmend ersetzen. Das heißt, für Holz ist eine möglichst hochwertige und soweit möglich mehrfache Nutzung anzustreben. Der Ausbau der photovoltaischen Stromerzeugung (PV) birgt ein großes Umweltentlastungs- und Ressourceneffizienzpotenzial, da diese in der Nutzung unabhängig vom Einsatz fossiler oder biotischer Energieträger ist. Unsicherheiten der Rohstoffverfügbarkeit könnten allerdings den Ausbau verlangsamen. Schlüsselemente der Dünnschichtphotovoltaik wie Indium, Tellur, Gallium oder Germanium lassen sich nur als Koppelprodukte von Massenmetallen wie Aluminium, Zink, Blei und Kupfer gewinnen. Schon wenn sich die Nachfrage gering verändert, kann sich dies stark auf die Preisentwicklung auswirken. Darüber hinaus besteht aufgrund der sehr geringen

Einsatzkonzentrationen der Technologiemetalle die Gefahr eines dissipativen, also unwiederbringlichen Verlusts durch Feinverteilung in größeren Stoffströmen.

Beim Betrieb von Windenergieanlagen werden keine fossilen Energieträger eingesetzt. Gleichwohl sind – wie auch bei den PV-Modulen – Rohstoffe notwendig, um die Anlagen zu produzieren, zu errichten und instandzuhalten. Die verwendeten Seltenen Erden Neodym und Dysprosium zählen außerdem zu den besonders kritischen Rohstoffen. Sie sind einerseits als Bestandteil von Elektromagneten technisch bedeutend für getriebelose, hocheffiziente und wartungsarme Windenergieanlagen, andererseits aber in ihrer Verfügbarkeit stark eingeschränkt. Die hohe Materialintensität von Windenergieanlagen bezieht sich auf ihre Produktions- und Errichtungsphase. So gehen – im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken – beim Offshore-Windpark Alpha Ventus 78 % des gesamten Energieaufwands und der lebenszyklusweiten Treibhausgasemissionen auf die materialbezogenen Vorketten und die Installation der Anlagen zurück. Trotzdem hat sich der Windpark nach etwa 7 bis 9 Monaten Betriebszeit energetisch amortisiert. Allerdings bildet die energetische Betrachtung allein noch nicht die Umweltauswirkungen und die gesundheitlichen Folgen der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung in den Förderländern ab. Um diese negativen Effekte des Rohstoffabbaus und der -raffination perspektivisch zu reduzieren, sind Windenergieanlagen nach Ablauf ihrer Betriebszeit als anthropogene Rohstofflagerstätten von hohem Rückgewinnungs- und Verwertungsinteresse zu betrachten.

Die Elektromobilität soll künftig zu Emissionsminderungen im Verkehrssektor beitragen. Hierbei können die Batterien in Elektrofahrzeugen als Zwischenspeicher für Strom aus Erneuerbaren Energien genutzt werden. Es ist zu erwarten, dass ein Großteil der zukünftigen Elektrofahrzeuge Traktionsbatterien auf Basis von Lithium-Ionen-Technik nutzen wird. Sie enthalten je nach Kathodentyp Lithium und Kobalt. Während nach Einschätzung von Umbrella 2011 die

geologischen Reserven von Lithium in den nächsten Jahrzehnten den Bedarf decken können, könnte bei Kobalt der kumulierte Verbrauch bereits zwischen 2040 und 2050 die heute bekannten Kobaltreserven von 7,3 Mio. t überschreiten. Schwierig werden könnte in diesem Zusammenhang zukünftig auch die Versorgung mit Neodym und Dysprosium für den Permanentmagnetmotor. Pilotprojekte zu Recyclingverfahren sollten daher flächendeckend und großtechnisch innerhalb von zehn Jahren realisiert werden. Generell gilt, dass Entscheidungen in der Produktgestaltung den Ressourcenverbrauch und das Entstehen von Abfällen sowie die Nutzungsdauer und -variabilität der Produkte maßgeblich bestimmen. Ressourcenschonende und abfallvermeidende Produkte zeichnen sich zunächst durch den Einsatz einer möglichst geringen Materialmenge aus, sowie durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen bei denen die ökologischen Rucksäcke der Rohstoffvorketten berücksichtigt werden. Die Nutzungsdauer dieser Produkte ist möglichst lang. Sie sind ressourceneffizient in der Nutzungsphase und können am Lebensende möglichst demontiert werden, einzelne Bestandteile lassen sich weiter nutzen oder dem Wertstoffkreislauf zuführen. Um natürliche Ressourcen zu schonen, Abfall zu vermeiden und die Umwelt insgesamt zu entlasten (einschließlich der Minderung von Treibhausgasemissionen), ist der gesamte Lebensweg eines Produkts oder Systems zu betrachten.

Besonders augenfällig sind die Zusammenhänge zwischen Klimaschutz und Ressourcenproduktivität im Bereich der Industrie: Heute gehen etwa 50 Prozent der industriellen CO₂-Emissionen darauf zurück, dass die fünf Grundstoffe der industriellen Produktion hergestellt und verarbeitet werden: Stahl, Zement, Papier, Kunststoff und Aluminium. Das heißt, Lösungen, die den Einsatz dieser Produkte reduzieren, tragen damit auch zum Klimaschutz bei. Es gibt viele Wege, entlang der Wertschöpfungskette mit weniger Rohstoffen und in Folge dessen mit weniger Energie auszukommen. Das langfristige Ziel muss aus Sicht des Umweltbundesamtes sein, den pro Kopf Rohstoffverbrauch bis 2050 um den Faktor 5 bis 10 zu senken.

Fazit/Diskussion

Ein treibhausgasneutrales Deutschland mit einem jährlichen Pro-Kopf-Ausstoß von 1 Tonne CO_{2Äq} im Jahr 2050, was einer Senkung der Emissionen um 95 % im Vergleich zum Jahr 1990 entspricht, ist technisch möglich. Wir beschreiben eine mögliche Option in einem Lösungsraum. Es ist möglich, nicht nur die Stromversorgung, sondern auch den Kraft- und Brennstoffbedarf mit erneuerbaren Energien zu decken.

Basis unseres Szenarios ist, dass die Energieversorgung vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt wird und Effizienzpotentiale weitgehend ausgeschöpft werden. Damit gehen die Emissionen aus dem Energiesektor auf nahezu Null zurück und auch die anderen Sektoren können ihre Emissionen wesentlich

mindern. Ein zentraler Baustein für unser Szenario ist die Umwandlung von erneuerbar erzeugtem Strom zu Wasserstoff, zu Methan und höherkettigen Kohlenwasserstoffen. Nur so kann in unserem Szenario der Bedarf an Kraft-, Brenn- und Rohstoffen in den Sektoren Industrie und Verkehr sowie dem Wärmesektor gedeckt werden. Damit steigt der Strombedarf stark an, weit hinaus über die Strommenge, die als überschüssiger Strom bezeichnet werden kann.

Die technischen Potentiale, diese Strommengen national zu erzeugen, sind zwar vorhanden. Da aber zum Beispiel aus ökologischen oder ökonomischen Gründen nur ein Teil dieser Potentiale sinnvoll erschlossen werden kann, gehen wir davon aus, dass ein Teil des in Deutschland benötigten Stroms im Ausland produ-

Abbildung 8:

Überblick zum möglichen Anwendungsbereich von Power to Gas/Power to Liquid im UBA THGND 2050 – Szenario



Quelle: Umweltbundesamt, 2013

ziert würde. PtG und PtL könnten dann ebenfalls am Ort der Stromerzeugung erfolgen und die Brenn- und Kraftstoffe könnten importiert werden. Der Anteil Primärenergieimporte^{XIV} läge unter der Annahme einer nationalen Stromversorgung (466 TWh) entsprechend heutiger Verhältnisse in der gleichen Größenordnung wie heute.

Um ein treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 zu verwirklichen, sind in einigen Bereichen Technologieinnovationen und die Weiterentwicklung heutiger Technik notwendig. Hier besteht Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Wir haben uns in unserer Studie am besten derzeit verfügbaren Stand der Technik orientiert. Allerdings sind wir auch bei neuen Technologien und technischen Anwendungen, die bislang nur in kleinem Maßstab erprobt sind, von einer breiten Markteinführung ausgegangen. Uns ist bewusst, dass hierfür zahlreiche Technik- und Technologieinnovationen im Laufe der nächsten vier Jahrzehnte notwendig sind. So stehen beispielsweise Power to Gas und vor allem Power to Liquid erst am Beginn der marktreifen Umsetzung. Derzeit sind in Deutschland mehrere Demonstrationsanlagen in Betrieb. In Island wird bereits eine Power to Liquid-Anlage kommerziell betrieben.

Um den Lösungsraum zu erweitern und besonders geeignete Transformationspfade zu identifizieren, sind weitere Analysen notwendig. So sollte untersucht werden, ob der hohe Strombedarf gesenkt werden kann. Dies gilt besonders für den Verkehrssektor. Hier muss geprüft werden, ob die Anwendung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff und der direkte Einsatz von Strom ausgebaut werden können. Auch weitere Verkehrsvermeidungs- und Verlagerungspotentiale sind zu prüfen.

Wasserstoff wird heute noch nicht als Endenergieträger eingesetzt – weder zur Verstromung noch im Verkehr. Hier besteht erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Gegenüber Methan und flüssigen Kraftstoffen hat Wasserstoff erhebliche Vorteile (geringere Umwandlungsverluste), allerdings auch Nachteile (geringere Energiedichte).

Inwieweit mehr Strom im Verkehr direkt eingesetzt werden kann bzw. ob statt flüssigen Kraftstoffen in Zukunft gasförmige wie Methan oder Wasserstoff

eingesetzt werden können, ist zukünftig zu untersuchen. Beim möglichen Einsatz von Wasserstoff ist die notwendige Infrastruktur einer intensiven umfassenden Betrachtung zu unterziehen.

Mit Wasserstoff können die hohen Umwandlungsverluste deutlich verringert werden, damit sinkt auch der Strombedarf^{XV}. Derzeit diskutierte Vorschläge, zum Beispiel die Installation von Oberleitungen auf Autobahnen und die damit verbundene Umstellung von Lkw auf Hybrid-Betrieb müssen mit Blick auf die Effizienz des Gesamtsystems und die Kosten weiter untersucht und bewertet werden.

Wir haben für das Jahr 2050 angenommen, dass sich auch Energie einsparen lässt, indem Verkehr vermieden und verlagert wird. Dabei wurde nur eine gemäßigte, aus heutiger Sicht wahrscheinliche Entwicklung betrachtet. Werden weitreichende Maßnahmen umgesetzt (z. B. Fahrbeschränkungen) oder treten weitreichende Verhaltensänderungen ein (z. B. Lebensstiländerungen), würde dies zu stärkeren Vermeidungs- und Verlagerungswirkungen führen. Eine Akzeptanz solch weitreichender Maßnahmen setzt jedoch eine intensive gesellschaftliche Debatte voraus.

Unsere Studie klammert die Betrachtung von Kosten aus. Uns geht es darum, in einem ersten Schritt zu zeigen, ob ein klimaneutrales Deutschland überhaupt technisch darstellbar ist. Wie viel es kosten wird, die Emissionen um 95 % zu senken, können wir daher nicht sagen. Hier müssen weitere Untersuchungen zeigen, wie sich die Kosten im Einzelnen darstellen würden. Außerdem ist zu analysieren, welche ökonomischen und regulatorischen Rahmenbedingungen notwendig sind, um die Entwicklung und Marktdiffusion der erforderlichen technischen Innovationen anzustoßen.

Langfristige ökonomische Analysen sind stets mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Zum Teil ist über die Kosten einzelner Techniken noch wenig bekannt, zum Beispiel zu den Kosten von Power to Gas und Power to Liquid. Durch die hohen Umwandlungsverluste steigen die Kosten jedoch mit jeder weiteren Umwandlungsstufe vom Wasserstoff zu flüssigen Kraftstoffen allein schon durch den hohen Stromverbrauch. Hier besteht Forschungsbedarf. Kostenbetrachtungen für die verschiedenen Antriebs- und Kraftstofftechniken im Verkehrssektor, die auch

Lernkurven berücksichtigen, sind eine wichtige Voraussetzung um umfassend bewerten zu können, sie wurden jedoch in dieser Studie nicht vorgenommen.

In unserer Studie betrachten wir nicht die Frage, welche Rahmenbedingungen geschaffen werden müssen, um bestimmte Techniken einzuführen. Dies betrifft zum Beispiel den Einsatz von Methan in der chemischen Industrie als Kohlenstoffquelle. Eine Umstellung der Mineralölindustrie ist nicht zu erwarten, solange Öl kostengünstiger als regeneratives Methan ist, zumal großtechnische Investitionen erforderlich sind. Die Politik müsste dazu geeignete Rahmenbedingungen schaffen.

Ein treibhausgasneutrales Deutschland sollte sich an weiteren Nachhaltigkeitskriterien orientieren. Insbesondere die Wechselwirkungen zur Ressourcenproduktivität müssen weiter untersucht werden.

Den Anbau von Biomasse zur ausschließlich energetischen Nutzung haben wir wie in der Einleitung beschrieben aus Gründen der Nachhaltigkeit ausgeschlossen. Im Gegensatz zu anderen Studien berücksichtigen wir auch CCS nicht, unter anderem weil die Speicherkapazitäten begrenzt sind. Die Nutzung der Kernenergie ist für Deutschland keine Option mehr.

Wechselwirkungen zur Ressourcenproduktivität konnten wir in unserer Studie nicht abbilden. Hier muss weiter untersucht werden, wie sich die Ziele des Klimaschutzes und der Ressourceneffizienz sinnvoll ergänzen und wie sich etwaige Widersprüche zwischen beiden Zielen auflösen lassen.

Auch müssen manche Klimaschutztechniken noch auf ihre Umweltauswirkungen hin untersucht und bewertet werden.

Bei einer umfassenden Betrachtung müssen auch mögliche Verlagerungen von Emissionen ins Ausland berücksichtigt werden. In unserer Studie geschieht dies nur ansatzweise.

Wir haben nur die im Inland entstandenen Emissionen betrachtet – angelehnt an die Methode für die Emissionsberichterstattung. Es werden also jene Emissionen nicht berücksichtigt, die im Ausland entstehen, bei denen wir aber durch Warenimporte für ihre Entstehung „verantwortlich“ sind. Andererseits werden Deutschland auch die Emissionen aus der

Produktion von Waren angelastet, die in Deutschland produziert und dann exportiert werden. Entsprechende Bilanzierungen der Stoff- und Energieströme im Zusammenhang mit Warenimporten und -exporten werden in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) und den Ökobilanzen vorgenommen, konnten hier aber wegen der großen Komplexität zu treffender Annahmen für das Jahr 2050 nicht berücksichtigt werden (vgl. Ein treibhausgasneutrales Deutschland in europäischer und internationaler Perspektive, S. 5). Ausnahme sind die Fälle, bei denen der Zusammenhang sehr augenfällig war. So haben wir zum Beispiel bewusst die Annahme gesetzt, dass kein Biosprit importiert wird, wegen der damit verbundenen Flächenkonkurrenzen und den beim Anbau der Biomasse verursachten Emissionen vor allem aus der indirekten Landnutzung. Auch im Kapitel Landwirtschaft wurde das Thema Verlagerung von Emissionen aufgegriffen. Wir haben in dieser Studie zwar vorwiegend technische Lösungsoptionen untersucht, nehmen aber z. B. für die Landwirtschaft an, dass sich die Menschen im Jahr 2050 gesund ernähren – das heißt im Wesentlichen weniger Fleisch essen als heute. Damit gehen die Tierbestände deutlich zurück. Nur so lassen sich die Emissionen in der Landwirtschaft weit genug senken, ohne dass es zu Leakage-Effekten^{xvi} durch massiven Mehrimport von Fleisch kommt.

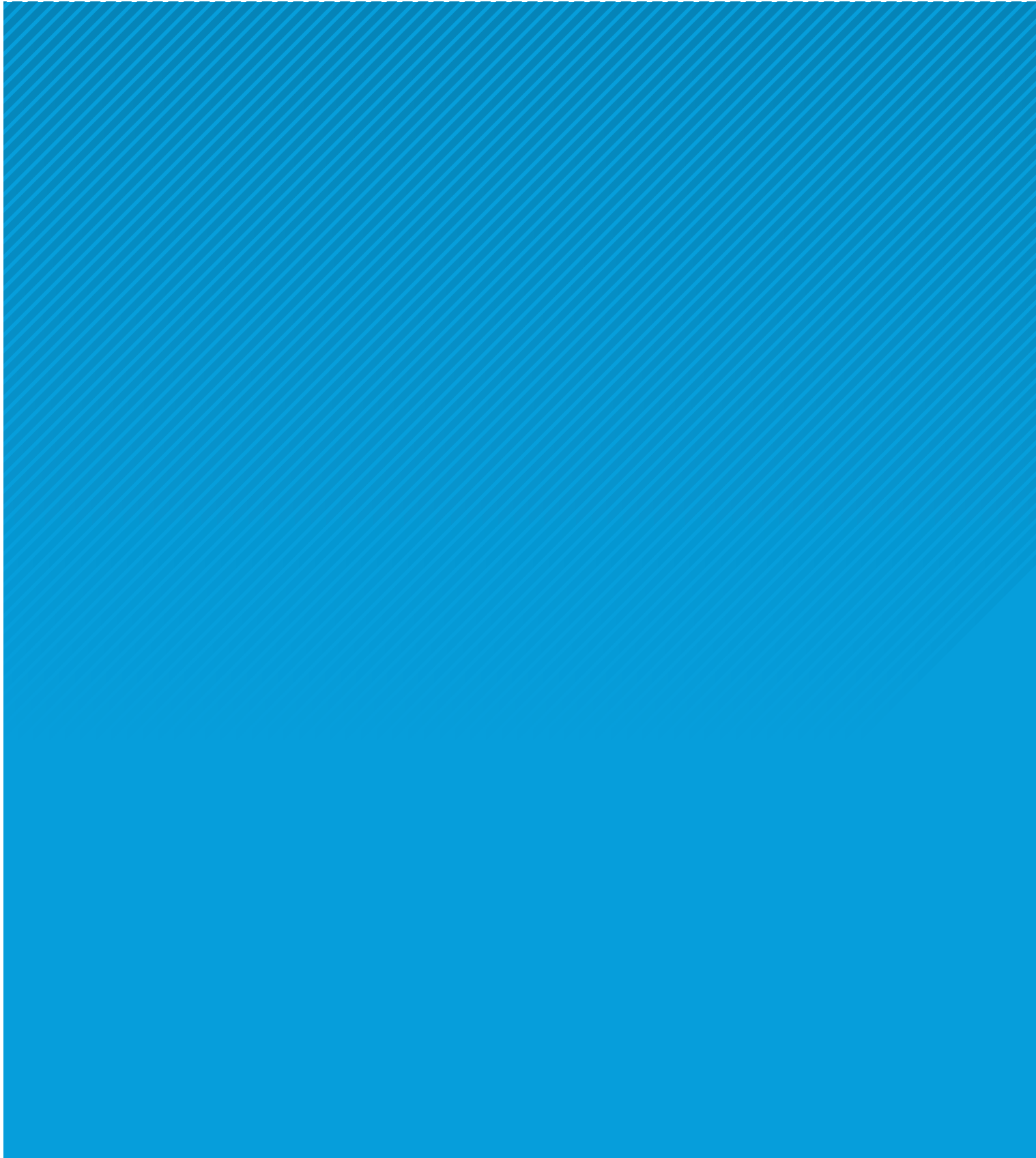
Wir legen dieses Szenario vor, um die wissenschaftliche Diskussion über die möglichen Lösungsräume für ein treibhausgasneutrales Deutschland, für treibhausgasneutrale Industrieländer heute zu beginnen. So können wir mittels Forschung, Entwicklung und Demonstration früh die Voraussetzungen für politische Entscheidungen schaffen. Dies ermöglicht, auch die notwendigen Maßnahmen und Instrumente, die nötig sind um ein treibhausgasneutrales Deutschland zu realisieren, frühzeitig zu diskutieren und entsprechend zu implementieren.

Fußnoten

- I Deutschland hat sich international im Rahmen des Kyoto-Protokolls zur Reduktion der Treibhausgasemissionen um 21 % für den Zeitraum 2008/2012 gegenüber 1990 verpflichtet. Darüber hinaus hat die Bundesregierung im Herbst 2010 ein Energiekonzept vorgelegt und im Juni 2011 aktualisiert. Dieses sieht einen steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Energieerzeugung in Deutschland bei gleichzeitigem Ausstieg aus der Kernenergie vor. Hinzu kommen differenzierte Ziele zur Verringerung des Energieverbrauchs in unterschiedlichen Sektoren. Zudem wurden konkrete Minderungsziele für Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 festgelegt: 40 % bis 2020, 55 % bis 2030, 70 % bis 2040 und 80 bis 95 % bis 2050.
- II Die Zahlen orientieren sich an der Variante 1 der 11. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes von 2006.
- III Vergleiche dazu auch die weiteren Ziele in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung „Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“ von 2002.
- IV Vgl. Studie vom Umweltbundesamt „Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen“.
- V Carbon Capture and Storage – Technische Abscheidung und geologische Speicherung von Kohlendioxid.
- VI Der rechnerische Wert liegt bei 51 %. Es ist zu beachten, dass für 2050 der internationale See- und Flugverkehr mit bilanziert wurde. Derzeit ist dies nicht der Fall.
- VII Bezogen auf Primärenergie.
- VIII Bezogen auf Nettostromerzeugung.
- IX Für die Kraftstoffbereitstellung wurde ein Wirkungsgrad von 50 % angenommen.
- X Davon 91,1 TWh für Elektromobilität.
- XI Die Gärreste können dann als Dünger eingesetzt werden.
- XII Abgegrenzt gemäß UNFCCC Quellgruppe 4 – Landwirtschaft.
- XIII Englisch: Land Use, Land Use Change, Forestry.
- XIV Entsprechend unserer Studie ist die Nettostromerzeugung für 2050 der Primärenergie gleichzusetzen.
- XV Nettostrombedarf.
- XVI Mit Leakage-Effekten ist die Verlagerung der Emissionen ins Ausland gemeint.

Quellen

- 1 Umweltbundesamt (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen, Dessau-Roßlau
- 2 Umweltbundesamt (2012): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2012 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010, Dessau-Roßlau
- 3 Umweltbundesamt (2010): Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen, Dessau-Roßlau. S. 16
- 4 Umweltbundesamt (2012): Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen, Dessau-Roßlau
- 5 Umweltbundesamt (2012): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen 2008 (Auswertung für das Jahr 2008), Climate Change 07/2012, Dessau-Roßlau.
- 6 Umweltbundesamt (2012): Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010, Dessau-Roßlau, S. 571 ff.
- 7 Osterburg, B., Kätsch, S., Wolff, A. (2013): Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050, Thünen-Report, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Braunschweig.
- 8 Osterburg, B., Kätsch, S., Wolff, A. (2013): Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050, Thünen-Report, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Braunschweig.
- 9 Osterburg, B., Kätsch, S., Wolff, A. (2013): Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050, Thünen-Report, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Braunschweig.
- 10 Thünen Institut (2011): The German Reference Level for Forest Management, Hintergrundpapier, Information for the Federal Ministry of food, agriculture and consumer protection (BMELV), Eberswalde und Hamburg.
- 11 Osterburg, B., Kätsch, S., Wolff, A. (2013): Szenarioanalysen zur Minderung von Treibhausgasemissionen der deutschen Landwirtschaft im Jahr 2050, Thünen-Report, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Braunschweig.
- 12 Blanck, R; Kasten, P; Hacker, F; Mottschall, M. (2013): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050: Ein Szenario der zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr, Sachverständigengutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.



► **Download als pdf**

www.uba.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de

 www.twitter.com/umweltbundesamt