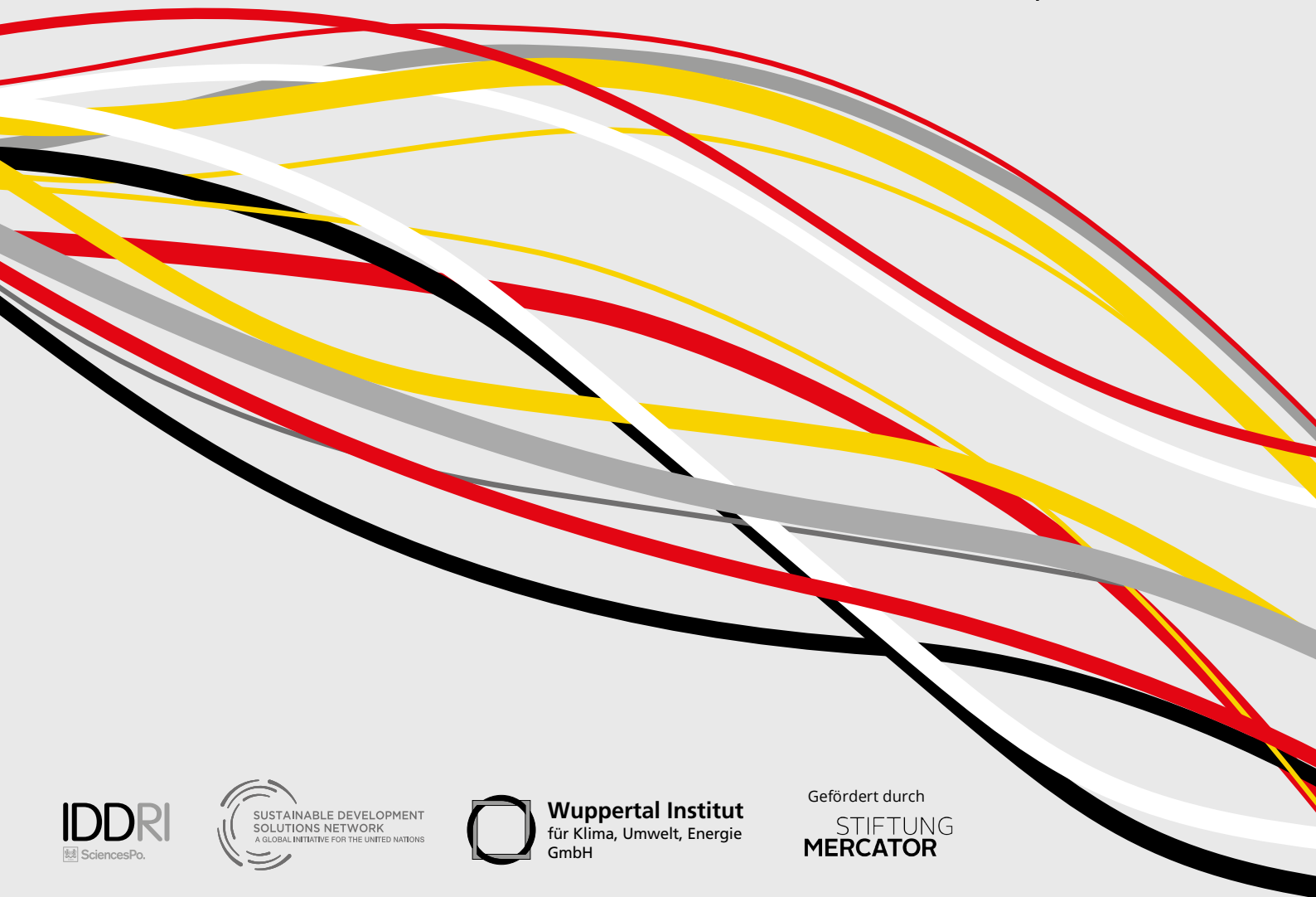


DE 2015 Report

Wege zu einer
weitgehenden Dekarbonisierung
Deutschlands

Kurzfassung



Vorstellung des Wuppertal Instituts

Nachhaltige Entwicklung bedarf eines integrierten Politik- und Wissenschaftsansatzes. Denn die Fragestellungen einer zukunftsfähigen Entwicklung sind häufig nicht innerhalb von Ressortgrenzen oder einzelner wissenschaftlicher Disziplinen zu beantworten. Hier setzt das Forschungsprogramm des Wuppertal Instituts an. Es ist transdisziplinär und am Systemverständnis orientiert. Die Forschung des Wuppertal Instituts richtet sich auf die Gestaltung von Übergängen ("Transitions") zu einer nachhaltigen Entwicklung.

Das Wuppertal Institut wird in der Rechtsform der gemeinnützigen GmbH geführt und erhält eine Grundfinanzierung vom Land Nordrhein-Westfalen. Es ist im Verantwortungsbereich des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen angesiedelt. Den größten Teil seines Budgets erwirtschaftet das Institut mit extern finanzierten Projekten.

Autorinnen und Autoren

Katharina Hillebrandt

Sascha Samadi

Manfred Fishedick

Beteiligte Autorinnen und Autoren

Sascha Eckstein

Samuel Höller

Tomke Janßen

Kristof Kamps

Christine Krüger

Stefan Lechtenböhrer

Jan Nigge

Andreas Pastowski

Piet Sellke (DIALOGIK gemeinnützige Gesellschaft für Kommunikations- und Kooperationsforschung mbH)

Danksagung

Die Autoren dieses Berichts möchten sich bei der Stiftung Mercator für die finanzielle Unterstützung der Arbeit im Rahmen der DDPP-Initiative bedanken. Des Weiteren danken sie dem bei IDDRI angesiedelten DDPP-Sekretariat, insbesondere Roberta Pierfederici und Henri Waisman, für hilfreiche Kommentare zu früheren Versionen dieses Reports. Vielen Dank an Ivan Pharabod für die Gestaltung der Abbildungen und das Layout des Berichts. Schließlich möchten wir auch den Entwicklern der drei in diesem Report analysierten Szenarien für die Bereitstellung zusätzlicher Informationen zu den Szenarien danken.

September 2015

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie gGmbH

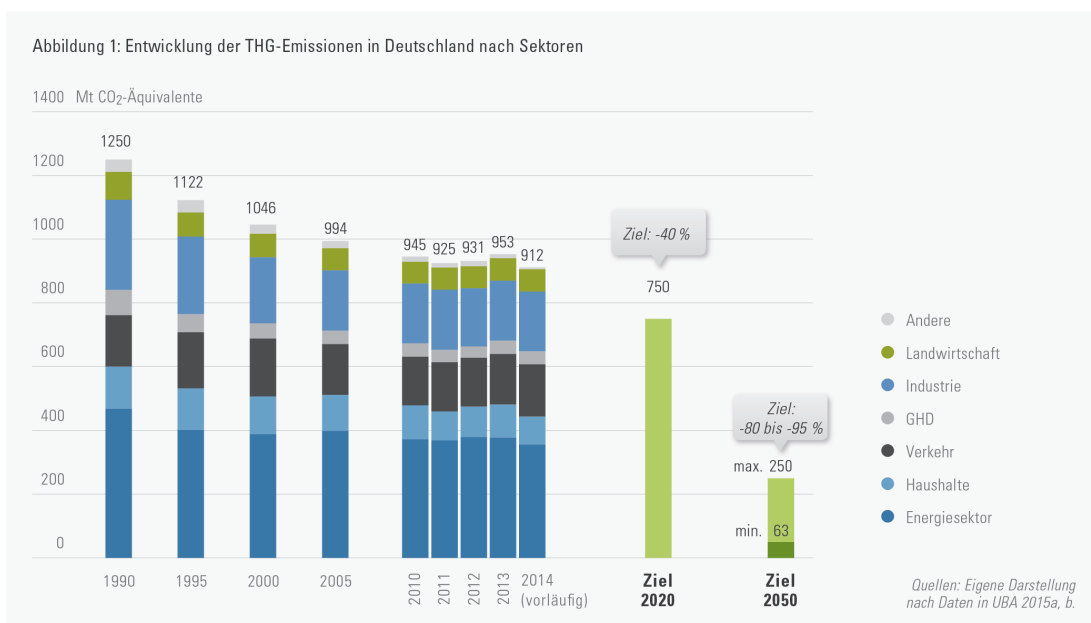
1. Einleitung

Damit die Weltgemeinschaft den Gefahren des Klimawandels erfolgreich begegnen kann, muss dieses Thema auf vielen verschiedenen politischen Ebenen adressiert werden, sowohl national als auch international und gemeinsam adäquate Antworten gesucht werden. Vor dem Hintergrund der spezifischen Klimaschutz-Herausforderungen wurde das Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP) 2013 vom United Nations Sustainable Development Solutions Network (UNSDSN) und vom Institut für Nachhaltige Entwicklung und Internationale Beziehungen (IDDRI) gegründet. Das DDPP ist eine globale Gemeinschaftsinitiative, die aufzeigen soll, wie für den Klimaschutz besonders relevante Länder den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft gestalten können. Damit soll ein entscheidender Beitrag zum Erreichen des international vereinbarte Ziels der Begrenzung des durch den Menschen verursachten Anstiegs der globalen Oberflächentemperatur auf weniger als 2° C gegenüber dem vorindustriellen Niveau erreicht werden. Laut Analysen der Klimaforschung kann dieses Ziel nur erreicht werden, wenn die globalen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) spätestens in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts gegen Null gehen. Dies erfordert schon bis Mitte des Jahrhunderts eine tiefgreifende Veränderung der Energiesysteme und ist nur bei einem sehr starken Rückgang der Kohlenstoffintensität in allen energierelevanten Sektoren möglich. Dieser Prozess wird im Rahmen der DDPP-Initiative als "deep decarbonization" bezeichnet.

Entsprechend der Vorgehensweise der anderen fünfzehn Ländertteams untersucht dieser Bericht mögliche Wege, um eine weitgehende Dekarbonisierung Deutschlands umzusetzen. Dazu wird diskutiert, wie das Ziel der Bundesregierung, die inländischen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 % bis 95 % (gegenüber 1990) zu reduzieren, erreicht werden kann, was robuste Strategien dafür sind, welche Handlungsoptionen speziell für das Erreichen der oberen Bandbreite des Minderungszieles bestehen, welche Herausforderungen mit der Umsetzung verbunden sind und wie auf diesem Weg eine adäquate Brücke in eine treibhausgasfreie Zukunft gebaut werden kann. Hierfür wurde u. a. eine vergleichende Analyse heute für Deutschland vorliegender Energieszenarien durchgeführt.

2. Bisherige THG-Emissionsminderungen und das Ziel der deutschen Regierung für 2050

In den vergangenen Jahren hat Deutschland signifikante THG-Emissionsminderungen erreicht und – als ein wichtiger Meilenstein – sein länderspezifisches Ziel im Rahmen des Kyoto-Protokolls erfüllt. Im Bezugszeitraum für das Kyoto-Protokoll (2008 bis 2012) lagen die THG-Emissionen in Deutschland im Mittel um 23,6 % unterhalb des Niveaus des Jahres 1990, die im Kyoto-Protokoll für Deutschland festgelegte Zielmarke von 21 % wurde dabei deutlich überschritten. Bis 2014 konnten die THG-Emissionen gegenüber 1990 um 27 % reduziert werden (siehe Abbildung 1).



In fast allen Sektoren konnten in diesem Zeitraum signifikante THG-Emissionsminderungen erreicht werden (Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD) 53 %, Industrie 34 %, Haushalte 33 %, Energiesektor 24 %, Landwirtschaft 21 %). Nur im Verkehrssektor blieb das Niveau der THG-Emissionen quasi unverändert (164 Mio. t CO₂-Äquivalente in 2014 vs. 163 Mio. t CO₂-Äquivalente in 1990).

Bei der Analyse der Entwicklung ist jedoch zu beachten, dass ein signifikanter Teil der Emissionsminderungen seit 1990 nicht auf klimapolitische Maßnahmen, sondern auf die deutsche Wiedervereinigung zurückzuführen ist. Eichhammer u. a. (2001) schätzen, dass aufgrund des Zusammenbruchs der ostdeutschen Wirtschaft nach der Wiedervereinigung im Vergleich mit einem hypothetischen Referenzwert circa 9 % THG-Emissionen (105 Mio. t CO₂-Emissionen) – sogenannte „Wallfall profits“ – im Jahr 2000 vermieden werden konnten.

Eine Analyse der Quellen der deutschen THG-Emissionen zeigt, dass die große Mehrheit der Emissionen (rund 85 %) zurzeit aus energetischen Quellen stammt (insbesondere aus dem Energiesektor, dem produzierenden Gewerbe, dem Verkehr und den Kleinf Feuerungsanlagen). Der Großteil der übrigen Emissionen entsteht in industriellen Prozessen (z. B. prozessbedingte CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung) und in der Landwirtschaft. Da energetische Quellen für die meisten Emissionen verantwortlich sind, zielen THG-Minderungsmaßnahmen in sehr vielen der vorliegenden Analysen überwiegend auf das Energiesystem ab.

In den vergangenen Jahren hat sich jedoch die Geschwindigkeit der THG-Emissionsminderung verringert. Um THG-Reduktionen von 80 % bis 95 % bis zum Jahr 2050 zu realisieren, müssen die Emissionen in den folgenden Jahren und Jahrzehnten um durchschnittlich mindestens 3,5 % pro Jahr gesenkt werden. Diese jährliche Minderungsrate entspricht in etwa den höchsten jemals in Deutschland erzielten Werten. Dies stellt eine große Herausforderung dar, weil zukünftige Fortschritte – im Gegensatz zum erfolgreichen Start der Transformation des deutschen Energiesystems – tiefe strukturelle Veränderungen des Energiesystems erfordern werden. Dazu gehört nicht nur ein stufenweiser Umbau des Energiesystems auf den Einsatz klimaverträglicher Energieträger, sondern auch die Schaffung des dafür notwendigen politischen, institutionellen, kulturellen und sozialen Rahmens. Dies schließt Verhaltensänderungen auf unterschiedlichen Ebenen ebenso ein wie die Notwendigkeit einer breiten und über den langen Zeitraum konstanten Unterstützung sowie Akzeptanz durch die Bevölkerung – der Umgestaltungsprozess wird damit noch näher an die Bürgerinnen und Bürger heranrücken. Die Nagelprobe für den Willen und die Möglichkeit, die Klimaschutzziele zu erreichen, steht dabei schon bis 2020 an, denn die Lücke zwischen der bis heute erreichten Reduktion der THG-Emissionen (-27 %, Stand 2014) und der Zielmarke für das Jahr 2020 (-40 %) ist angesichts des kurzen Zeitraums sehr groß. Mit dem im Herbst 2014 verabschiedeten Klimaschutzaktionsplan versucht die Bundesregierung die Lücke zu schließen. Es bleibt abzuwarten, ob und in welchem Maße dies gelingt.

3. Weitgehende Dekarbonisierungspfade für Deutschland – ein Vergleich dreier illustrativer Szenarien

Mögliche Wege einer Dekarbonisierung in Deutschland werden im Folgenden anhand von drei THG-Minderungsszenarien vergleichend analysiert und diskutiert. Diese drei Szenarien wurden als illustrative Szenarien aus der Vielzahl aktueller Szenariostudien für Deutschland ausgewählt¹:

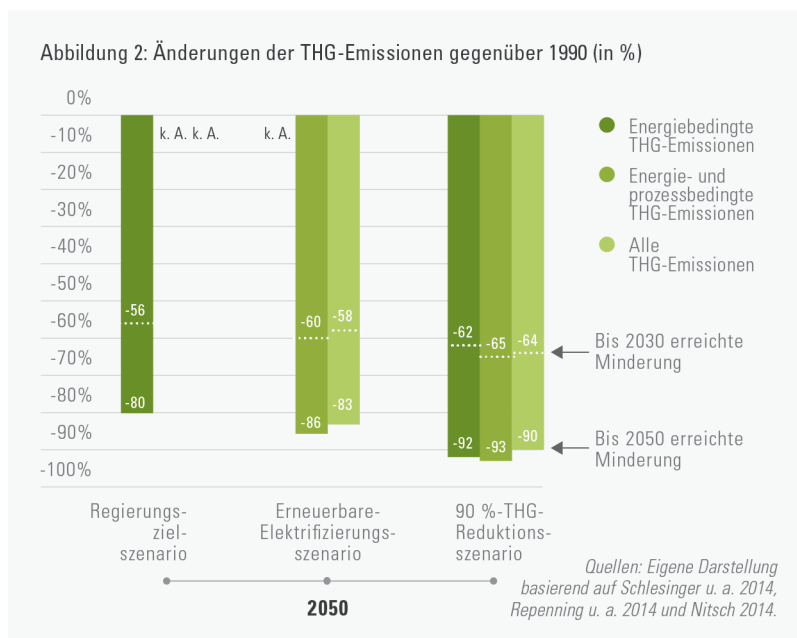
- „Zielszenario“ aus der Studie „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“ (Schlesinger u. a. 2014), hier als **„Regierungszielszenario“** bezeichnet
- Szenario „100-II“ aus der Studie „GROKO II – Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzentwurfs“ (Nitsch 2014), hier **„Erneuerbare-Elektrifizierungsszenario“** genannt
- Szenario „KS 90“ aus der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ (Repenning u. a. 2014), hier als **„90 % THG-Reduktionsszenario“** bezeichnet

Die detaillierte Analyse der den Szenarien zugrunde liegenden Annahmen zeigt, dass alle drei Szenarien nicht von drastischen oder plötzlichen Veränderungen in der Entwicklung sozialer und ökonomischer Parameter ausgehen. Es werden z. B. weder bahnbrechende technologische Entwicklungen oder Durchbrüche noch drastische Lebensstiländerungen, eine Deindustrialisierung oder eine weitere große Wirtschaftskrise angenommen.

Die drei Szenarien kommen zu THG-Emissionsreduktionen von 80 % bis 90 % bis zum Jahr 2050 (s. Abbildung 2). Somit werden die von der Bundesregierung anvisierten THG-Minderungsziele in den Szenarien erreicht. Es ist zu beachten, dass die in den Szenarien berücksichtigte Bandbreite von THG-Emissionen variiert: Während das

¹ Für die ausgewählten Szenarien wurden im Rahmen dieser Studie plakative Bezeichnungen gewählt, die unter Berücksichtigung der komplexen Architektur der Szenarien zwangsläufig stark vereinfachenden Charakter haben, für die Gesamtausrichtung und Schwerpunktsetzung der betrachteten Szenarien aber als gute Orientierung dienen können.

„Regierungszielszenario“ nur energiebedingte THG-Emissionen in Betracht zieht und beschreibt, wie diese um 80 % bis 2050 reduziert werden können, geht das „Erneuerbare-Elektrifizierungsszenario“ von einer Minderung der energie- und prozessbedingten THG-Emissionen um 86 % bis zur Mitte des Jahrhunderts aus. Das „90 %-THG-Reduktions-Szenario“ betrachtet alle THG-Emissionen und beschreibt einen Pfad, der – wie am Szenario-Namen zu erkennen ist – eine Emissionsreduktion von 90 % bis zum Jahr 2050 erreicht (jeweils gegenüber den Emissionen des Jahres 1990).



Obwohl die analysierten Szenarien teils unterschiedliche THG-Emissionsreduktionsstrategien berücksichtigen, spielen drei Strategien, die erheblich zur THG-Minderung beitragen, in allen drei Szenarien eine zentrale Rolle:

- Energieeffizienzverbesserungen (in allen Sektoren, vor allem im Gebäudebereich)
- Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Inland (mit einem Schwerpunkt auf der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien)
- Elektrifizierung (d. h. verstärkter Einsatz von Strom als Endenergieträger) und (in zwei Szenarien) auch Nutzung auf Basis erneuerbarer Energien erzeugter synthetischer Gase und Treibstoffe (power-to-gas/fuels) in den Endenergiesektoren (besonders im Verkehrssektor und der Industrie)

Die Grundzüge der drei als robust einzuordnenden Strategien werden nachfolgend skizziert. Soweit möglich werden die Strategien im Vergleich zu den bestehenden Zielen der Bundesregierung quantitativ eingeordnet.

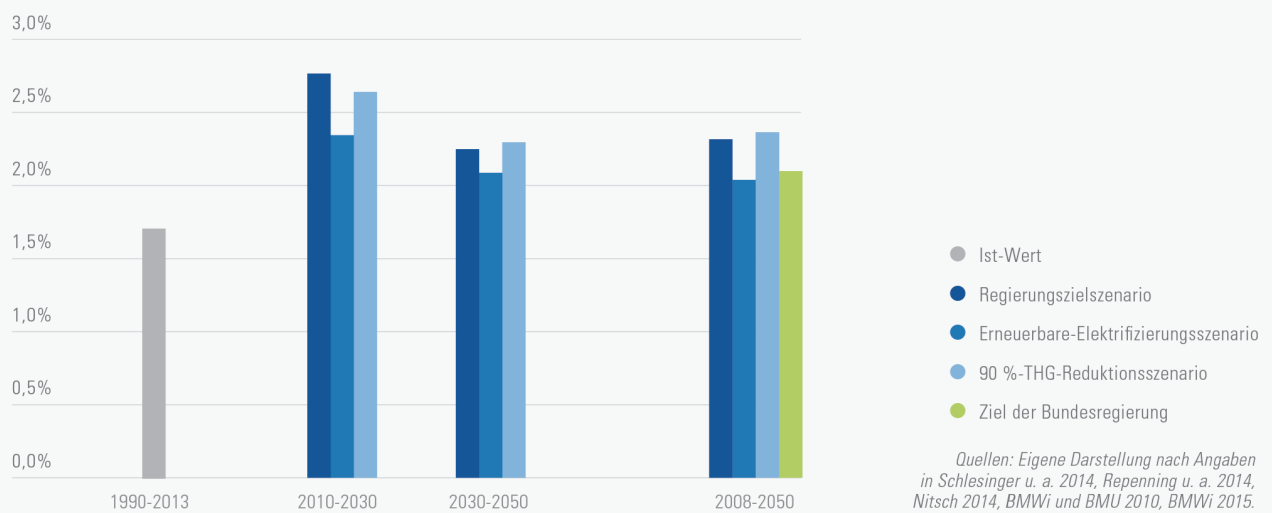
Energieeffizienzverbesserungen

Die Bundesregierung hat sich offiziell zum Ziel gesetzt, die Endenergieproduktivität (d. h. das Verhältnis Bruttoinlandsprodukt (BIP)/Endenergieverbrauch) zwischen 2008 und 2050 um jährlich 2,1 % zu verbessern. Die Zielerreichung soll zu einem Rückgang des Primärenergieverbrauchs um 50 % zwischen 2008 und 2050 führen (BMWi und BMU 2010). Die drei analysierten Szenarien erwarten durchschnittliche jährliche Verbesserungen der Endenergieproduktivität zwischen 2,0 % und 2,4 % (s. Abbildung 3), was nahezu dem Regierungsziel entspricht.

Abbildung 3 zeigt, dass zwischen 1990 und 2013 die Endenergieproduktivität in Deutschland um jährlich 1,7 % gestiegen ist (Verwendung temperaturbereinigter Daten). Dies ist vor allem auf den Einsatz effizienterer Kraftwerke und die Erschließung von Energieeffizienzpotenzialen in der Industrie und in Haushalten zurückzuführen (BMUB 2014)². Dementsprechend wird die Energieproduktivität in den kommenden Jahren und Jahrzehnten signifikant gesteigert werden müssen, damit Deutschland seine Energie- und Klimaziele erreichen kann. Jüngste Detailstudien zeigen, dass dies grundsätzlich möglich ist und dass ein Großteil der Effizienzmaßnahmen bereits unter den derzeitigen ökonomischen und ordnungspolitischen Voraussetzungen kosteneffizient zu erschließen ist (Schloman u. a. 2014).

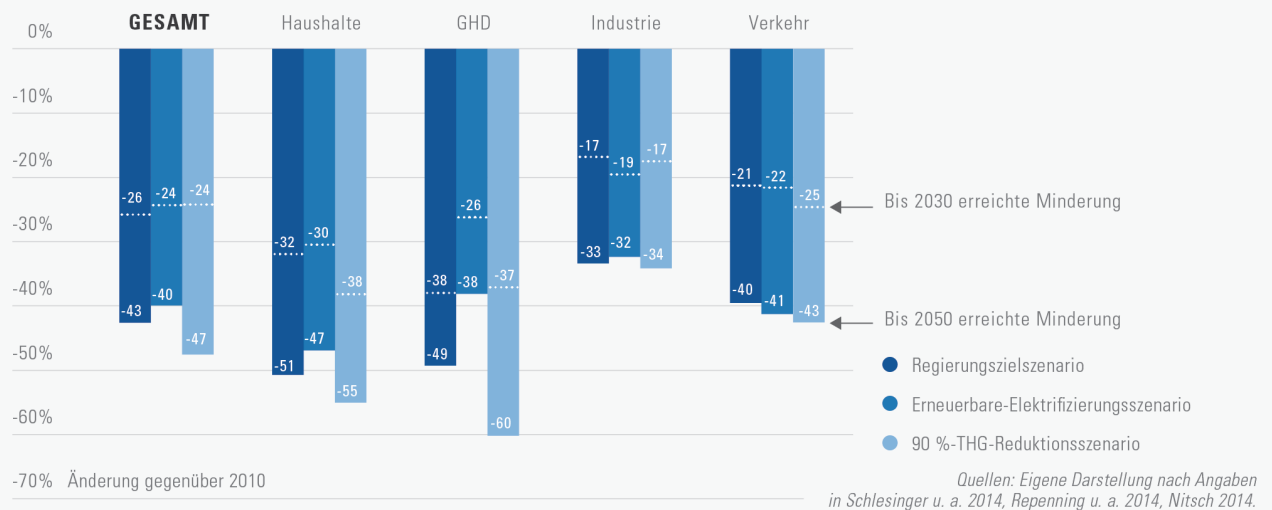
² Generell sind Energieeffizienzverbesserungen makroökonomisch oft nur schwer messbar, da selbst temperaturbereinigte Indikatoren durch Faktoren wie den Strukturwandel (z. B. im produzierenden Gewerbe hin zu weniger energieintensiven Produkten) beeinflusst werden.

Abbildung 3: Durchschnittliche jährliche Änderung der Endenergieproduktivität



Die drei hier detaillierter betrachteten Szenarien setzen bei der Verbesserung der Endenergieproduktivität primär auf deutliche technologische Energieeffizienzsteigerungen in allen Anwendungsbereichen. Für das Jahr 2050 liegen die resultierenden Endenergieeinsparungen zwischen 40 % und 47 % gegenüber dem Niveau des Jahres 2010 (s. Abbildung 4). Die Reduktion bzw. Begrenzung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen spielt hingegen keine bzw. nur eine sehr untergeordnete Rolle³. Während die Veränderung der Gesamtendenergie-nachfrage in allen drei Szenarien ähnlich ist, sind größere Unterschiede zwischen den individuellen Sektoren erkennbar (s. Abbildung 4).

Abbildung 4: Änderung der Endenergienachfrage gegenüber 2010 (in %)



Im Vergleich zur Gesamtendenergienachfrage variiert der Strombedarf im Jahr 2050 deutlich stärker zwischen den drei ausgewählten Szenarien. Im „Regierungszielszenario“ ist die Stromnachfrage im Jahr 2050 um rund 120 TWh (oder 20 %) geringer als im Jahr 2014, während sie im „Erneuerbare-Elektrifizierungsszenario“ ca. 225 TWh (oder fast 40 %) höher ist als 2014 (v. a. aufgrund der dort angenommenen starken Elektrifizierung von Prozessen und einer umfangreichen Wasserstoffherzeugung). Im „90 % THG-Reduktionsszenario“ liegt die Stromnachfrage auf einem ähnlichen Niveau wie im Jahr 2014.

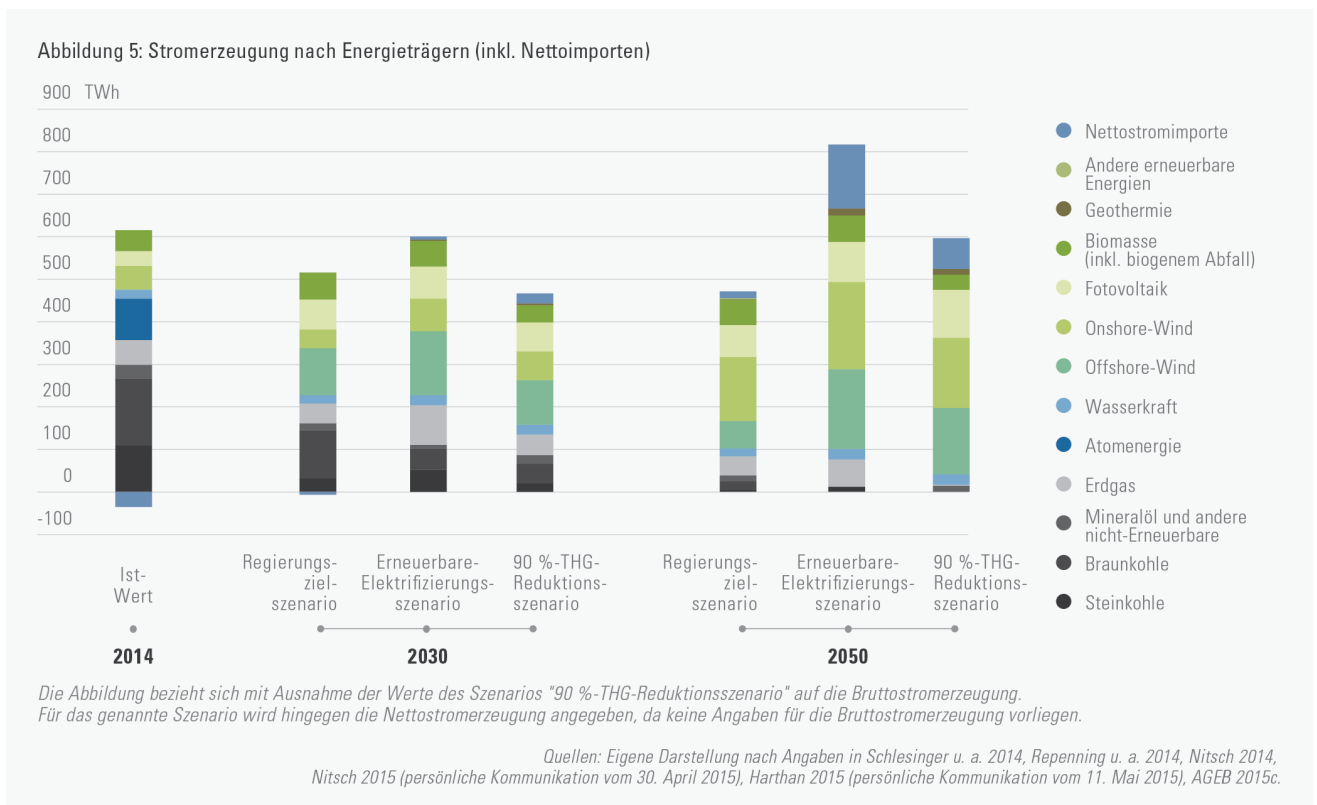
³ Allerdings wird in den Szenarien implizit angenommen, dass Rebound-Effekte (d. h. die Kompensation technischer Energieeinspareffekte durch die vermehrte Nachfrage nach Energiedienstleistungen, z. B. die Nutzung eingesparter Energiekosten für die zusätzliche Anschaffung energetischer Anwendungen) insgesamt begrenzt bleiben.

Verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Inland

Neben Energieeffizienzverbesserungen ist eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen in der deutschen Stromversorgung in allen drei Szenarien eine Hauptstrategie zur Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems. Entsprechend der aktuellen politischen Ziele sollen erneuerbare Energiequellen mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs im Jahr 2050 abdecken.

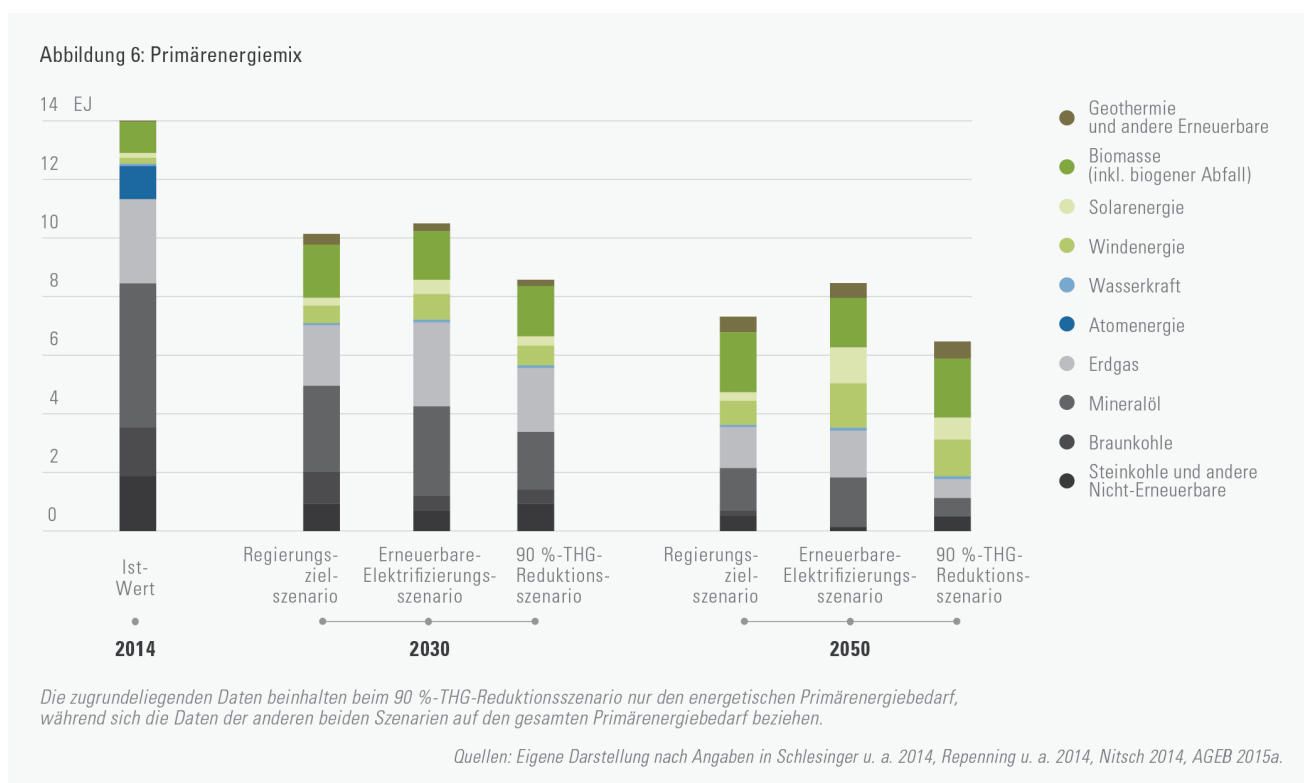
In den vergangenen 15 Jahren ist die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen in Deutschland stark angestiegen. Dies ist vor allem auf das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zurückzuführen, das im Jahr 2000 in Kraft trat und den Ausbau regenerativer Energiequellen durch einen festgelegten, technologiespezifischen Einspeisetarif fördert. Seit der EEG-Einführung ist der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von unter fünf Prozent in den 1990er Jahren auf ca. 28 % im Jahr 2014 angewachsen. Die wichtigsten erneuerbaren Energiequellen zur Stromerzeugung in Deutschland sind derzeit Onshore-Windenergie (9 % in 2014), Biomasse (8 %, inkl. biogener Abfallanteil) und Solarenergie (6 %) (AGEB 2015c).

Wie Abbildung 5 zeigt, setzen alle drei analysierten Szenarien darauf, dass sich die Stromerzeugung aus inländischen erneuerbaren Energiequellen zwischen 2014 und 2030 ungefähr verdoppeln wird. Die beiden ambitionierteren Szenarien gehen bis zum Jahr 2050 sogar von einem Anstieg auf mehr als das Dreifache des gegenwärtigen Niveaus aus. Des Weiteren wird in den Szenarien angenommen, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aufgrund der größeren direkten Einsatzmöglichkeiten schneller ansteigen wird als der Beitrag erneuerbarer Energien im Wärme- und insbesondere im Verkehrssektor: Während der Anteil des erneuerbar erzeugten Stroms an der gesamten primärenergetischen Nutzung erneuerbarer Energien im Jahr 2014 bei 40 % lag, steigt er – je nach Szenario – bis 2050 auf 41 % bis 56 % an.



In Bezug auf den zukünftigen Primärenergiemix erwarten die drei Szenarien einen Anteil erneuerbarer Energien von 51 % bis 73 % im Jahre 2050 (gegenüber 11 % im Jahr 2014, siehe Abbildung 6, AGEB 2015a, b). Der Energiemix in Deutschland würde sich damit in nur wenigen Jahrzehnten drastisch verändern und von der heutigen sehr starken fossilen Basis weitgehend auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Biomasse bleibt in allen drei Szenarien im Jahr 2050 die wichtigste erneuerbare Energiequelle, dicht gefolgt von Windenergie. Im Bereich der fossilen Energieträger sinkt der gemeinsame Anteil von Braun- und Steinkohle (heute 25 %) deutlich auf dann nur noch 2 % bis 9 %, während Öl (heute 35 %) mit einem Anteil von 9 % bis 20 % im Jahr 2050 noch eine bedeutendere Rolle spielt und vor allem im Verkehrssektor nach Umwandlung in Benzin-, Diesel- oder Kerosinprodukte genutzt wird. Auch Erdgas bleibt mit Anteilen von 10 % („90 % THG-Reduktionsszenario“) bis 20 % (im Falle der beiden anderen analysierten Szenarien) im Jahr 2050 weiterhin relevant und bildet eine Art „Brückenenergieträger“ im Rahmen der Transformation hin zu einer durch erneuerbare Energiequellen dominierten Energieversorgung. Dabei ist zu betonen, dass in allen drei Szenarien im Betrachtungszeitraum der

Primärenergiebedarf deutlich – um 44 % bis 54 % – zurückgeht und somit auch der absolute Bedarf an fossilen Energieträgern stärker rückläufig ist, als es die Änderung der relativen Anteile nahelegt.



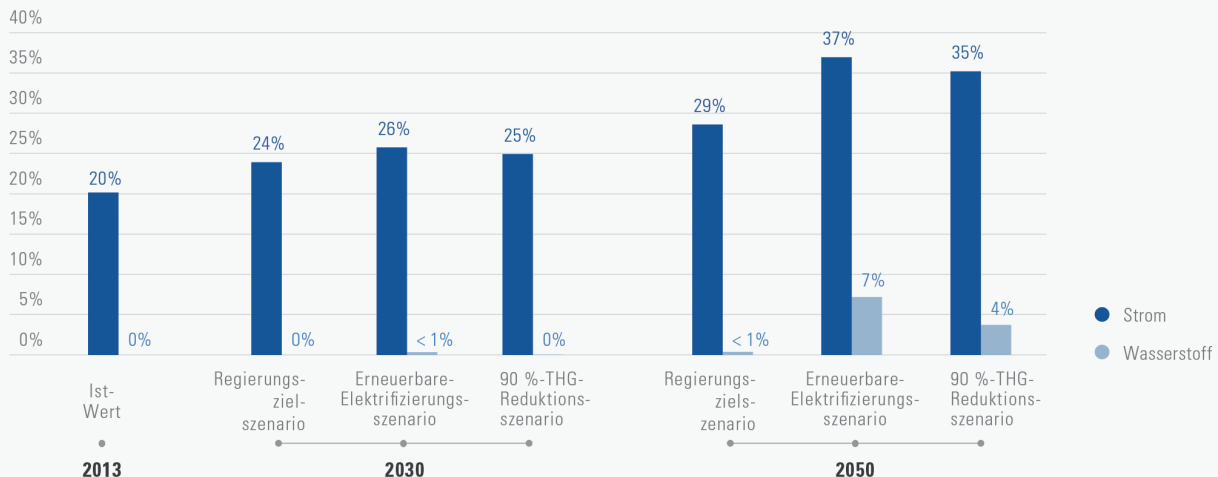
Elektrifizierung und Nutzung auf Basis erneuerbarer Energien erzeugter synthetischer Gase und Treibstoffe (power-to-gas/fuels)

Die Elektrifizierung von Prozessen und „power-to-x“ (mit „x“ als Variable für Wärme, Wasserstoff, Methan oder synthetische Kraftstoffe/Brennstoffe allgemein) werden in den meisten ambitionierten Szenarien als wichtige Dekarbonisierungsstrategien identifiziert, insbesondere um langfristig THG-Emissionen im Verkehrs- und Industriesektor deutlich zu reduzieren. Sowohl die Elektrifizierung von Prozessen als auch „power-to-x“ ist als Dekarbonisierungsstrategie allerdings an einen stark steigenden Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Stromerzeugung geknüpft. Wenn Strom nicht nachhaltig erzeugt würde, wäre eine „echte“ Dekarbonisierung insbesondere mittels „power-to-x“ kaum möglich, da sie zu einer vergleichsweise hohen Stromnachfrage führt und aufgrund der vielen zusätzlichen Prozessschritte große Umwandlungsverluste mit sich bringt. Stehen zukünftig aber hohe Stromerzeugungsbeiträge aus erneuerbaren Energien zur Verfügung, kommt es immer häufiger zu Phasen, in denen der erzeugte Strom nicht direkt von den Verbrauchern genutzt werden kann, über „power-to-x“ aber einer sinnvollen Weiternutzung zugeführt werden kann. Entsprechend kann „power-to-x“ bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien einen Beitrag zum Ausgleich der Fluktuationen, speziell der Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie, leisten.

Die drei analysierten Dekarbonisierungsszenarien gehen davon aus, dass Strom als Endenergieträger in Zukunft eine weitaus größere Rolle spielen wird als heute (Abbildung 7). Es wird erwartet, dass der Anteil von Strom an der Endenergienachfrage von 20 % im Jahr 2014 auf zwischen 29 % und 37 % im Jahr 2050 ansteigt. Wasserstoff wird in zwei von drei Szenarien ebenfalls als wichtige zukünftige Endenergiequelle angesehen, vor allem für den Einsatz im Verkehrssektor. Lediglich das „Regierungszielszenario“ nimmt nicht an, dass Wasserstoff in Zukunft eine große Rolle spielen wird. Dies wird in der Studie mit den hohen Kosten und Energieverlusten der elektrolytischen Wasserstoffproduktion begründet. Zudem zeigt sich an diesem Umstand, dass nicht nur die Grundsatzentscheidung für den Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft (oder eine vergleichbare „power-to-x“-Strategie) sehr stark von der Zielvorgabe der THG-Emissionsreduktion abhängt, sondern auch der Zeitpunkt des Einstiegs stark durch diese determiniert ist.⁴

⁴ Dabei ist zu beachten, dass das „Regierungszielszenario“ von allen drei analysierten Szenarien am ehesten auf den Ersatz fossiler Brennstoffe durch Wasserstoff verzichten kann, da dieses Szenario die geringste THG-Emissionsreduktion anstrebt.

Abbildung 7: Anteile von Strom und Wasserstoff an der Endenergienachfrage



Quellen: Eigene Darstellung nach Angaben in Schlesinger u. a. 2014, Repenning u. a. 2014, Nitsch 2014, Nitsch 2015 (persönliche Kommunikation vom 30. April 2015), AGEF 2015c.

Derzeit werden die Elektrifizierung von Prozessen und "power-to-x" noch nicht großflächig angewendet. Die Anzahl der registrierten Elektro-Fahrzeuge (d. h. batteriebetriebene Elektro-Fahrzeuge und Plug-in Hybrid-Fahrzeuge) in Deutschland belief sich Ende 2014 auf lediglich etwa 24.000 (NPE 2014) und damit weniger als 0,1 % des Fahrzeugbestandes. Auch der Einsatz von Strom für die Produktion von Wasserstoff (und Folgeprodukten wie Methan) ist momentan noch vernachlässigbar (Schlesinger u. a. 2014) und beschränkt sich primär auf – von der Anzahl allerdings zunehmende – Pilot- und Demonstrationsvorhaben. Die Nutzung der power-to-heat Technologie hat in den vergangenen Jahren hingegen moderat an Bedeutung gewonnen.

Da die drei genannten Strategien auch in anderen ambitionierten THG-Minderungszenarien für Deutschland wichtige Dekarbonisierungsstrategien darstellen, kann geschlossen werden, dass ihre erfolgreiche Umsetzung zur Erreichung maßgeblicher THG-Emissionsreduktionen bis 2050 zwingend erforderlich ist. Lediglich Intensität und zeitliche Steuerung der Umsetzung können je nach Annahmen voneinander abweichen.

Zusätzliche Strategien für eine weitgehende Dekarbonisierung

Die Szenarioanalyse zeigt, dass neben den drei genannten „Kernstrategien“ in Abhängigkeit von der Szenarioarchitektur und dem THG-Minderungsziel auch weitere Strategien zur Anwendung kommen müssen. Dies umfasst u. a. folgende Strategien, die in der gesellschaftlichen und politischen Diskussion zum Teil durchaus kontrovers diskutiert werden bzw. deren Wirkung und Umsetzbarkeit unterschiedlich eingeschätzt wird:

- Verringerung der Endenergienachfrage durch Verhaltensänderungen (Verlagerung auf andere Transportmittel im Verkehrssektor, Änderung der Ernährungs- und Heizgewohnheiten etc.)
- Nettoimporte von Strom aus erneuerbaren Energiequellen oder von Bioenergie
- Nutzung der CCS-Technologie („Carbon Capture and Storage“, d. h. CO₂-Abscheidung und -speicherung) zur Reduzierung der THG-Emissionen des Industriesektors

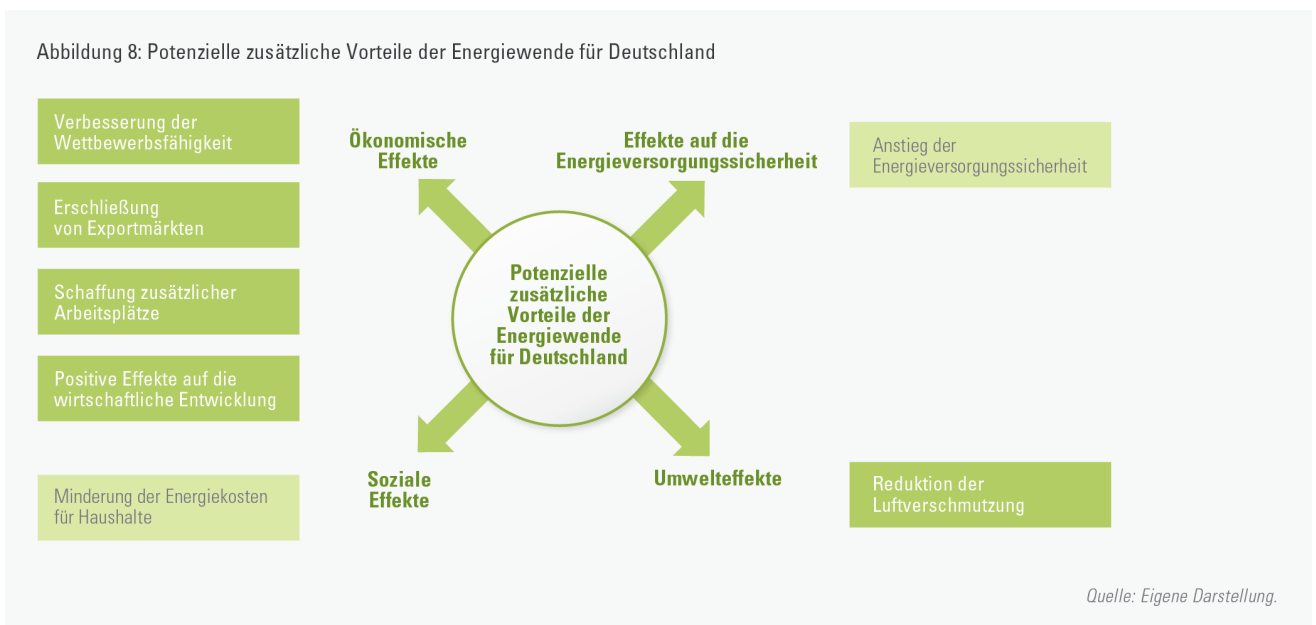
Unter anderem aufgrund ihrer aktuell relativ geringen Relevanz werden Strategien zur Reduzierung von nicht energiebedingten Emissionen (überwiegend Nicht-CO₂-Emissionen), die vor allem in der Landwirtschaft und Industrie anfallen, in Minderungsszenarien bisher weniger intensiv diskutiert. Diese Strategien werden jedoch in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da eine tiefgreifende Dekarbonisierung auch eine starke Verringerung dieser Emissionen gegenüber dem aktuellen Niveau erfordert. Es ist daher notwendig, in Zukunft auch Maßnahmen zur Minderung der nicht energiebedingten THG-Emissionen in stärkerem Maße auf die öffentliche und politische Agenda zu setzen.

Da in Deutschland ein weitgehender Konsens darüber herrscht, dass die Nachteile und Risiken der Kernkraft gegenüber ihrem potenziellen Klimanutzen überwiegen, wurde im Jahr 2011 ein beschleunigter Atomenergieausstieg beschlossen, der innerhalb von 11 Jahren umgesetzt werden soll. Folglich ist der Einsatz von Kernkraftwerken in keinem der aktuellen Szenarien für die Zeit nach 2022 vorgesehen. Die Nutzung von CCS in der Stromversorgung wird in den analysierten Szenarien ebenfalls nicht angenommen – u. a., weil diese Technologie auf geringe Akzeptanz in der Bevölkerung stößt und somit auch in der politischen Arena aktuell wenig Unterstützung findet.

Insgesamt zeigt die Analyse der drei repräsentativen Szenarien, dass eine weitgehende THG-Emissionsreduktion von 90 % und mehr bis zum Jahr 2050 (im Vergleich zu 1990) möglich ist und die dafür notwendigen Minderungsstrategien dafür zur Verfügung stehen.

4. Zusätzlicher Nutzen der „Energiewende“ für Deutschland

Neben THG-Emissionsminderungen kann die Umsetzung von Dekarbonisierungsstrategien auch die Realisierung anderer gesellschaftlicher Ziele positiv oder negativ beeinflussen. Zusätzliche vorteilhafte, aber nicht klimarelevante Auswirkungen der Minderungsmaßnahmen werden in der Klimaforschung als „Co-Benefits“ bezeichnet. Mögliche Co-Benefits für Deutschland beinhalten eine steigende Energieversorgungssicherheit durch geringere Energieimporte, eine höhere Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und geringere Energiekosten der Haushalte bei einer Ausschöpfung zumeist wirtschaftlicher Energieeinsparpotenziale. Hinzu kommen zentrale Impulse für die Innovationsdynamik im Industrie- und Technologieland Deutschland, die Erschließung darauf beruhender Exportchancen, die Schaffung zusätzlicher Arbeitsplätze sowie eine Verbesserung der Luftqualität und weniger negative Gesundheitsfolgen durch die Energieversorgung (siehe Abbildung 8).



Den Co-Benefits stehen auf der anderen Seite Herausforderungen gegenüber (z. B. Aufrechterhaltung der Stromnetzstabilität, Flächenverbrauch und Nutzungskonkurrenzen durch den Einsatz erneuerbarer Energien), die bei einer Umsetzung der verschiedenen Strategien unbedingte Beachtung finden müssen.

5. Herausforderungen für die Politik

Die größte Herausforderung auf dem Weg zu einer weitgehenden Dekarbonisierung Deutschlands stellt nach Analyse der Szenarien weniger die Planung und Entwicklung langfristiger Dekarbonisierungsstrategien als deren Umsetzung dar. Um diese zu unterstützen, müssen auf verschiedenen politischen Ebenen geeignete Strategien und Maßnahmen eingeführt werden.

Da Transformationsprozesse Hemmnissen, Unsicherheiten und Pfadabhängigkeiten unterworfen sind, müssen die mit der Transformation des Energiesystems verbundenen Herausforderungen möglichst frühzeitig identifiziert und adressiert werden. Konkrete Herausforderungen existieren dabei für jede der zentralen Dekarbonisierungsstrategien. In Bezug auf Energieeffizienzverbesserungen beinhalten diese Herausforderungen zum Beispiel das Erreichen eines signifikanten Anstiegs der Gebäudesanierungsrate und dessen Aufrechterhaltung auf hohem Niveau, die Entwicklung und Verbreitung von Low-Carbon-Technologien (z. B. für den Verkehrsbereich) sowie die möglichst weitgehende Begrenzung von Rebound-Effekten durch ein angepasstes (energiebewusstes) Verbraucherverhalten. Hinsichtlich des Ausbaus erneuerbarer Energiequellen zur Stromgewinnung ist es z. B. notwendig, die Entwicklung von Flexibilitätsoptionen zur Stabilisierung des Stromnetzes voranzutreiben sowie ein neues Strommarkt-Design zu entwerfen und einzuführen. Allgemein ist

es besonders wichtig, stabile Investitionsbedingungen zu gewährleisten, die Teilhabe an der Umsetzung des Transformationsprozesses zu erhöhen und nicht zuletzt auch die öffentliche Akzeptanz für notwendige Infrastrukturprojekte zu sichern. Von hoher Bedeutung ist auch die kontinuierliche Fortsetzung von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sowie die Durchführung von Demonstrationsvorhaben. Dies gilt z. B. für die derzeit noch weniger entwickelten Bereiche der Elektrifizierung von Prozessen und „power-to-x“. Hier muss ein einheitlicher und stabiler Politikrahmen als Anreiz für die Markteinführung geschaffen und Forschung und Entwicklung von innovativen Technologien gefördert werden.

6. Nächste Schritte

Dieser Bericht soll aufzeigen, dass trotz zweifelsohne zu überwindender Herausforderungen eine weitgehende Dekarbonisierung Deutschlands bis zum Jahr 2050 erreicht werden kann. Mit dem Energiekonzept aus dem Jahr 2011 und der Zielsetzung der Umsetzung einer „Energiewende“ hat die Bundesregierung einen wichtigen Meilenstein definiert. Sollen THG-Emissionsminderungen von 90 % oder mehr bis 2050 (im Vergleich zu 1990) erzielt werden, müssen die meisten oder sogar alle in der Analyse identifizierten Dekarbonisierungsstrategien erfolgreich umgesetzt werden. Eine einzelne „Königsstrategie“ steht aus heutiger Sicht nicht zur Verfügung. Aufgrund der in Deutschland seit etwa 30 Jahren erfolgenden kritischen Auseinandersetzung mit Klima- und Energiepolitik existiert eine große Menge theoretischen und praktischen Wissens über Transformationsprozesse. Dieses Wissen sollte genutzt und kontinuierlich erweitert werden, um die mit dem komplexen Prozess der weitgehenden Dekarbonisierung einhergehenden Herausforderungen richtig angehen zu können. Deutschland sollte zudem dafür offen sein, von Transformationsprozessen in anderen Ländern zu lernen, wie auch andere Länder von den in Deutschland gemachten Erfahrungen profitieren können. Mit der konsequenten Umsetzung der „Energiewende“ kann Deutschland wichtige globale Impulse dafür setzen.

Referenzen

- AGEb, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2015a). *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2014*. http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_jahresbericht2014.pdf
- AGEb, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2015b). *Energieverbrauch dank milder Witterung deutlich gesunken*. http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_pressedienst_01_2015_jahresbericht.pdf
- AGEb, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (2015c). *Bruttostromerzeugung in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern*. http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=20150227_brd_stromerzeugung1990-2014.pdf
- BMUB, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (2014). *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. Berlin. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_broschuere_bf.pdf
- BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015). *Zahlen und Fakten. Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung*. <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blog,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls>
- BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2010). *Energy Concept for an Environmentally Sound, Reliable and Affordable Energy Supply*. http://www.germany.info/contentblob/3043402/Daten/3903429/BMUBMWi_Energy_Concept_DD.pdf
- Eichhammer, W.; Boede, U.; Gagelmann, F. et al. (2001). *Treibhausgasemissionen in Deutschland und UK: Folge „glücklicher“ Umstände oder gezielter Politikmaßnahmen? Ein Beitrag zur internationalen Klimapolitik*. <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/treibhausgasemissionen.pdf>
- Nitsch, J. (2014). *GROKO – II, Szenarien der deutschen Energieversorgung auf der Basis des EEG-Gesetzesentwurfs – insbesondere Auswirkungen auf den Wärmesektor*. BEE, Bundesverband Erneuerbare Energien. http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/20140827_SzenarienderdeutschenEnergieversorgung_Waermesektor.pdf
- NPE, Nationale Plattform Elektromobilität (2014). *Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung*. http://www.bmbf.de/pubRD/NPE_Fortschrittsbericht_2014_barrierefrei.pdf
- Repenning, J.; Matthes, F. C.; Blanck, R. u. a. (2014). *Klimaschutzszenario 2050 1. Modellierungsrunde*. Öko-Institut, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung und dezentec. <http://www.oeko.de/oekodoc/2065/2014-638-de.pdf>
- Schlesinger, M.; Hofer, P.; Kemmler, A. u. a. (2014). *Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose*. BMWi, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Schломann, B.; Rohde, C.; Schade, W. et al. (2014). *Ausarbeitung von Instrumenten zur Realisierung von Endenergieeinsparungen in Deutschland auf Grundlage einer Kosten-/Nutzen-Analyse. Wissenschaftliche Unterstützung bei der Erarbeitung des Nationalen Aktionsplans Energieeffizienz (NAPE). Projekt BfEE 01/2014*. <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/ausarbeitung-von-instrumenten-zur-realisierung-von-endenergieeinsparungen-in-deutschland,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- UBA, Umweltbundesamt (2015a). *Treibhausgasemissionen in Deutschland im Jahr 2014 (erste Schätzung)*. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/treibhausgasemissionen_deutschland_2014_bf.pdf
- UBA, Umweltbundesamt (2015b). *Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland in der Abgrenzung der Sektoren des Aktionsprogrammes Klimaschutz 2020*. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/entwicl_treibhausgasemissionen_sektoren_2014.png

Kontakt:

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
Forschungsgruppe „Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“
Döppersberg 19
42103 Wuppertal
Tel.: +49 202 24 92-109
www.wupperinst.org

Institute for Sustainable Development and International Relations (IDDRI)
41 rue du Four
75006 Paris
FRANCE
Tel.: +33 1 45 49 76-60
www.iddri.org