

Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050 – Wege für die Energiewende

Markewitz, P., Robinius, M., Lopion, P., Stolten, D.

Einleitung

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80 bis 95% gegenüber dem Emissionsniveau von 1990 zu reduzieren. Auf dem UN Klimagipfel im September 2019 in New York bekannte sich die Bundesregierung dazu, langfristig bis zum Jahr 2050 treibhausgasneutral zu werden. Mit ihrem Energiekonzept leitete die Bundesregierung bereits im Jahr 2010 die Energiewende ein und formulierte einen vielfältigen Zielekanon, der im Laufe der Jahre kontinuierlich erweitert und modifiziert wurde. Die Bandbreite dieses Zielkanons ist groß und reicht z.B. von der Reduktion des Stromverbrauchs, der Vorgabe von Anteilen an erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch bis hin zu sektorspezifischen Treibhausgasemissionszielen des Klimaschutzplans. Zusätzlich wurde der Ausstieg aus der Kernenergieverstromung beschlossen.

Derzeit besteht weitgehend Unklarheit darüber, welche Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Sektoren bestehen und welches Technikportfolio für das Gelingen der Energiewende notwendig ist. Daneben stellt sich die Frage nach einer möglichst kosteneffizienten Transformationsstrategie. Diesen Fragestellungen wurde im Rahmen einer Studie nachgegangen.

Szenariendefinition und Annahmen

Für die Analyse wurden zwei Zielszenarien definiert. Das erste Szenario (Szenario 80) beschreibt einen Reduktionspfad mit einer Zielsetzung von 80% Treibhausgasminderung bis zum Jahr 2050, während das zweite Szenario (Szenario 95) einen Minderungspfad mit einer Zielmarke von 95% beschreibt. Die von der Bundesregierung für die Zwischenjahre gesetzten Mindestziele (2030: -55%, 2040: -70%, 2050: -80 bis 95%) beschreiben hierbei die Begrenzung der Treibhausgasemissionen im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2050. Bis auf diese übergeordneten Treibhausgasziele wurden bewusst keine weiteren Energiewendeziele vorgegeben. Ausnahmen sind der beschlossene Ausstieg aus der Kernenergieverstromung sowie der vorgeschlagene Pfad zum Ausstieg aus der Kohleverstromung der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ (Kohlekommission) [1]. Die erforderlichen Rahmendaten (z.B. Demografie, Energiepreise, BIP-Wachstum etc.) wurden weitestgehend aus dem BDI Szenario „Klimapfade für Deutschland“ [2] übernommen. Danach wird bis zum Jahr 2050 von einer leicht sinkenden Bevölkerungsentwicklung, von moderat steigenden Energiepreisen sowie von einem BIP Wachstum von 1,2% pro Jahr ausgegangen. Für das EU-weite und globale Umfeld wurde angenommen, dass eine ähnlich stringente Treibhausgasminderungspolitik verfolgt wird.

Methodik

Für die Analysen wurde eine Vielzahl von Modellen eingesetzt. So wurden techno-ökonomische Stromerzeugungspotenziale aus Windkraft und Photovoltaik längen- und breitengradgenau in stündlicher Auflösung für Deutschland, für Europa sowie für ausgewählte weltweite Regionen analysiert. Hierbei wurden auch Mindestabstände von Windkraftanlagen zu Häusern und Straßen berücksichtigt. Ein besonderer Fokus wurde auf die mögliche Rolle erneuerbarer Energieimporte (Wasserstoff, synthetische Kraftstoffe und synthetisches Methan) gelegt. Mit Hilfe eines Simulationsmodells wurden für ausgewählte wind- und sonnenreiche Regionen globale

Erzeugungspotenziale abgeschätzt und ein kostenbasierter weltweiter Markt simuliert. Die ermittelten Importkosten beinhalten die gesamte Wertschöpfungskette inklusive Transport und unterscheiden sich je nach Nachfrageland. Für die Abschätzung von Stromim- und -exporten wurde ein Strommarktmodell eingesetzt, welches das europäische Höchst- und Hochspannungsnetz knotenscharf inklusive Erzeuger abbildet. Darüber hinaus erfolgte eine modellbasierte Auslegung von Wasserstoffinfrastrukturen (Pipeline, Speicher etc.) unter Berücksichtigung der Elektrolysestandorte und der lokalen Wasserstoffnachfragen. Im Zentrum der Analysen steht das Optimierungsmodell NESTOR¹, welches die nationale Energieversorgung von der Primärenergie bis zur Endenergie über alle potenziellen Pfade technisch und kostenseitig abbildet. Unter Vorgabe der zuvor geschilderten Rahmenannahmen lässt sich mit dem Modell NESTOR der kostenoptimale Transformationspfad ermitteln. Die eingesetzten Modelle wurden miteinander gekoppelt und iterativ eingesetzt.

ERGEBNISSE

Verschiedene CO₂ Reduktionspfade führen zu unterschiedlichen Transformationsstrategien

Entsprechend den Zielvorstellungen der Bundesregierung dürfen im Szenario 80 im Jahr 2050 nur noch ca. 210 Mio. t CO₂ emittiert werden (Abbildung 1). Hauptemittenten sind der Energie- und der Industriesektor, die für fast drei Viertel der Emissionen verantwortlich sind. Demgegenüber liegen die Anteile für Verkehr und Gebäude mit 16% bzw. 10% deutlich niedriger. Der Einsatz von fossilen Energieträgern ist im Wesentlichen durch den Einsatz von konventionellem Erdgas (ca. 654 TWh) geprägt. Im Szenario 95 beträgt die noch zulässige Emissionsmenge ca. 52 Mio. t CO₂. Etwa 70% dieser Emissionen entfallen auf den Industriesektor, während die Sektoren Verkehr, Gebäude sowie der Energiesektor nahezu CO₂-frei sind. Hinzuweisen ist auf den ab dem Jahr 2040 relativ kurzen Handlungsspielraum von 10 Jahren, der eine hohe Veränderungsdynamik erfordert. Die Analysen zeigen, dass das von der Bundesregierung für das Jahr 2040 formulierte Zwischenziel nur mit der 2050er-Zielmarke einer Treibhausgasreduktion von 80% bis zum Jahr 2050 kompatibel ist.

CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050

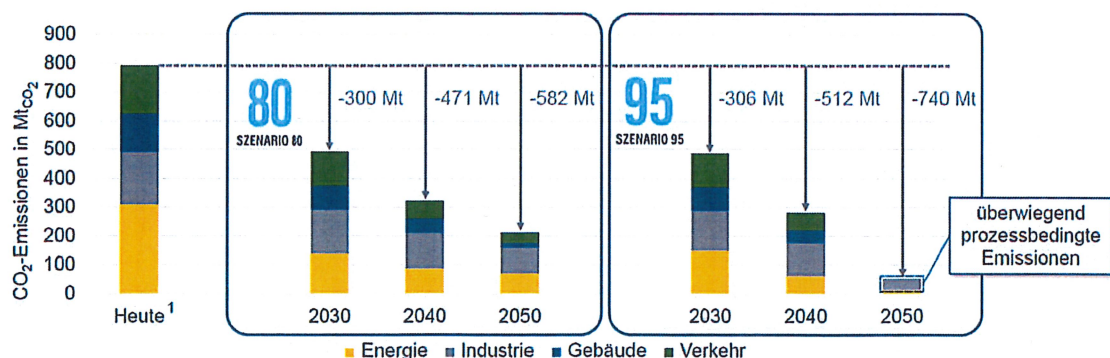


Abbildung 1: CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050

¹ NESTOR: National Energy System Model with integrated sector coupling

Wasserstoffimport und -bereitstellung

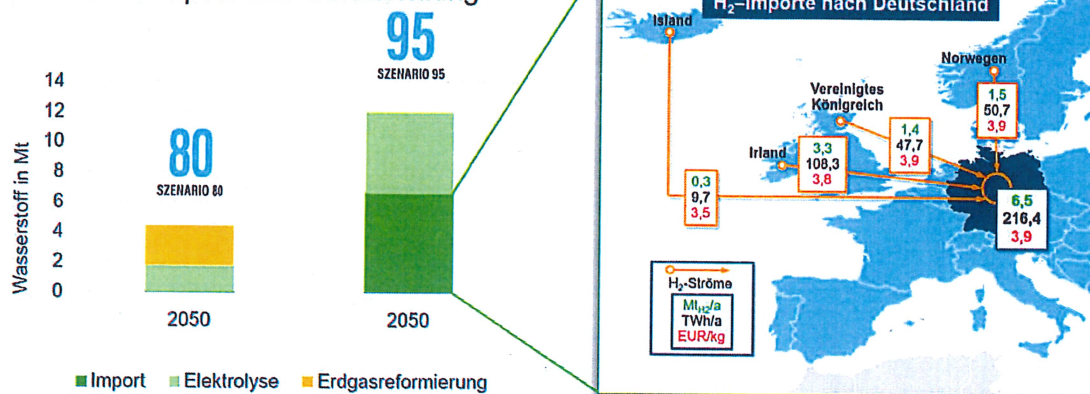


Abbildung 4: Wasserstoffbereitstellung und -import

Wasserstoff wird im Szenario 95 hauptsächlich in den Sektoren Industrie, Verkehr und im Energiesektor eingesetzt (Abbildung 5). Neben dem Einsatz zur Prozesswärmeerzeugung ist die Roheisenherstellung ein wichtiges Einsatzgebiet. So wird im Jahr 2050 die konventionelle Hochofenroute fast komplett durch das Verfahren der Wasserstoffdirektreduktion ersetzt, wofür der Einsatz von etwa 1,35 Mio. t Wasserstoff erforderlich ist. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist der Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor. Hervorzuheben ist insbesondere der Einsatz im Güterverkehr (Lkw, Züge). Im Energiesektor ist die Rückverstromung von Wasserstoff eine wichtiges Einsatzgebiet. So werden etwa 23% der gesamten Wasserstoffnachfrage verstromt. Ein auf vorwiegend volatiler Energieerzeugung beruhendes Energiesystem erfordert Optionen zur saisonalen Langzeitspeicherung. Auch hier besitzt Wasserstoff eine wichtige Bedeutung. So ist im Szenario 95 eine Umwidmung von Erdgaskavernenspeichern zu Wasserstoffkavernenspeichern mit einer Kapazität von 67 TWh notwendig. Der umfassende Wasserstoffeinsatz erfordert darüber hinaus den Bau einer adäquaten Transportinfrastruktur, der eine landesweite Versorgung ermöglicht (Abbildung 5).

Wasserstoffbedarf und -infrastruktur

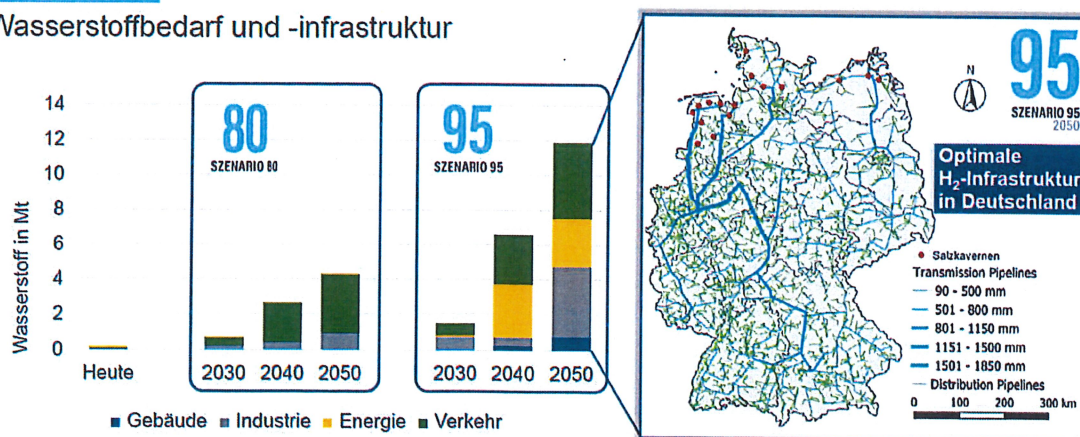


Abbildung 5: Wasserstoffbedarf und -infrastruktur

Beide Transformationspfade sind wirtschaftlich darstellbar

Substitution von fossilen Energieträgern führt zu einer zunehmenden Elektrifizierung

In beiden Reduktionsszenarien ist ein signifikanter Anstieg des Stromverbrauchs bis zum Jahr 2050 festzustellen, der im Wesentlichen auf die Substitution fossiler Energieträger durch Strom und Wasserstoff zurückzuführen ist (Abbildung 2). Im Szenario 80 liegt der Stromverbrauch im Jahr 2050 etwa um ein Drittel höher als der heutige Verbrauchswert. Im Szenario 95 erreicht der Nettostromverbrauch einen Wert von etwa 1008 TWh, was einem Anstieg von ca. 80% gegenüber dem heutigen Wert entspricht. Treiber für diese Anstiege sind insbesondere Sektorkopplungsmaßnahmen wie z.B. der zunehmende Einsatz von Wärmepumpen, die Erzeugung von Prozesswärme und insbesondere der Strombedarf für die Elektrolyse, dessen Anteil im Szenario 95 ca. 26% am Stromverbrauch im Jahr 2050 ausmacht.

Stromverbrauch bis zum Jahr 2050

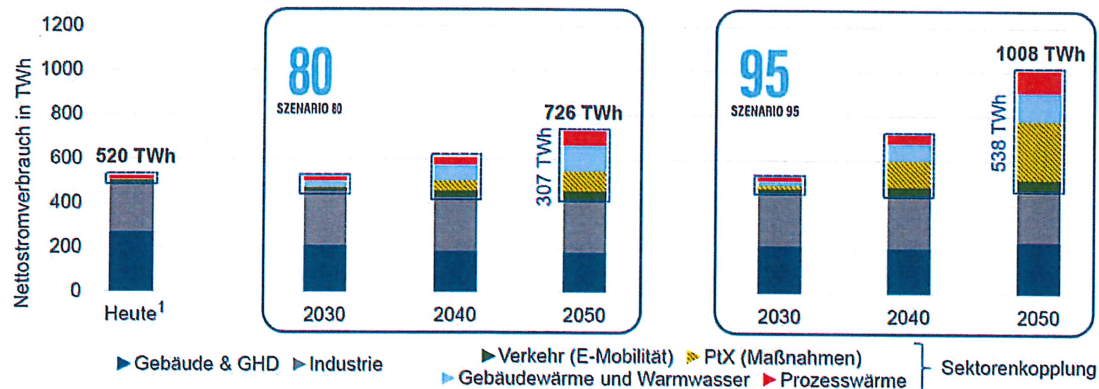


Abbildung 2: Stromverbrauch bis zum Jahr 2050

Für die Deckung des Stromverbrauchs ist ein massiver Ausbau erneuerbarer Stromerzeugungskapazität notwendig. Während die Stromerzeugung im Szenario 95 fast CO₂-frei erfolgt, basieren im Szenario 80 noch etwa 10% der Stromerzeugung auf fossilem Erdgas. Die installierte erneuerbare Kraftwerkskapazität beträgt im Szenario 80 im Jahr 2050 rund 296 GW, im Szenario 95 liegt der Wert mit rund 471 GW deutlich höher. Der Kapazitätsausbau wird in beiden Szenarien wesentlich durch den Ausbau von Windkraft und Photovoltaik getrieben. So beträgt die gesamte installierte Windkraftkapazität ca. 175 GW im Szenario 80 bzw. 264 GW im Szenario 95. Gegenüber der heute installierten Windkraftleistung bedeutet dies eine Steigerung um einen Faktor 3 bzw. Faktor 4,5. Um den Ausbauwert im Szenario 95 zu erreichen, ist über den gesamten Betrachtungszeitraum eine durchschnittliche jährliche Zubaurate von 5,6 GW (Onshore) erforderlich. Die zweite Säule der Stromerzeugung ist der Ausbau der PV-Kapazität. Die installierten Leistungen betragen im Jahr 2050 knapp 109 GW bzw. 167 GW und liegen gegenüber der heute installierten Leistung um einen Faktor 2,4 bzw. 3,7 darüber.

Energieeffizienz: Eine tragende Säule der Energiewende

Die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen in allen Sektoren (Industrie, Gebäude, Verkehr) spielt in beiden Szenarien eine herausragende Rolle. Gegenüber heute werden im Szenario 80 etwa 36% des

heutigen Endenergiebedarfs im Jahr 2050 eingespart. Der vergleichbare Wert für das Szenario 95 beträgt knapp 39%. Dies zeigt, dass bereits im Szenario 80 ein Großteil der Energieeffizienzmaßnahmen ergriffen werden und sie damit wirtschaftlich darstellbar sind. Hieraus lässt sich folgern, dass die Umsetzung von vielen Effizienzmaßnahmen in allen Sektoren ein robustes Handlungsfeld darstellt. Die modellbasierten Analysen geben auch einen Hinweis darüber, zu welchem Zeitpunkt energieeffiziente Maßnahmen ergriffen werden sollten. Dies sei am Gebäudesektor verdeutlicht (siehe Abbildung 3): So werden insbesondere bis zum Jahr 2035 (Phase I) verstärkt Einsparmaßnahmen ergriffen, wofür eine jährlich energetische Sanierungsrate von zeitweise 2% erforderlich ist. Ein verstärkter Einsatz von strombasierten Heizungstechniken (insbesondere Wärmepumpeneinsatz) erfolgt erst in der zweiten Phase ab dem Jahr 2035 bei einer sinkenden energetischen Sanierungsrate. Der Grund ist die starke Kopplung von Stromerzeugung und Gebäudewärmeversorgung. Da die Stromerzeugung bis zum Jahr 2035 in beiden Szenarien noch einen signifikanten CO₂-Fußabdruck aufweist, ist der Einsatz von gebäudeseitigen Effizienzmaßnahmen effektiver, um CO₂-Emissionen zu mindern.

Entwicklungen im Gebäudesektor

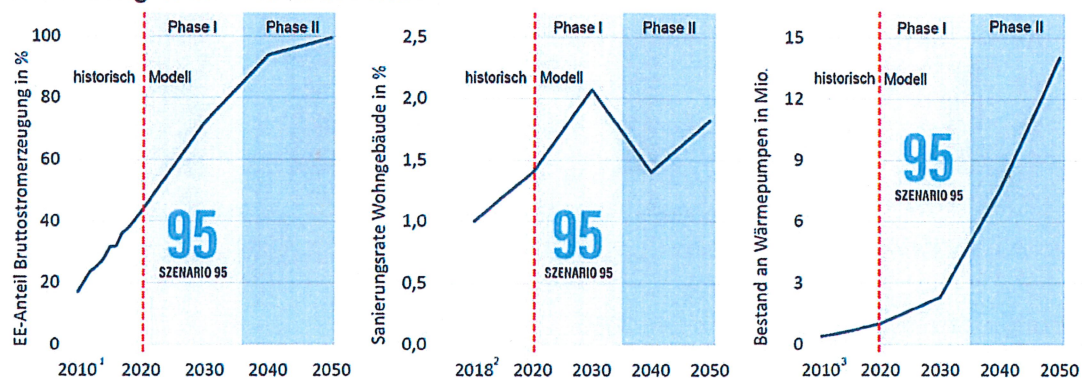


Abbildung 3: Entwicklungen im Gebäudesektor

Wasserstoff: Ein wichtiger Baustein für die Energiewende

Mit zunehmender CO₂-Restriktion spielt der Einsatz von Wasserstoff in beiden Szenarien eine immer wichtigere Rolle (Abbildung 4). So beträgt die erforderliche Wasserstoffmenge im Jahr 2050 für das Szenario 80 ca. 4 Mio. t. Im Szenario 95 liegt sie mit ca. 12 Mio.t um einen Faktor 3 höher. Während im Szenario 80 die Wasserstoffherzeugung aus einer Kombination von Erdgasreformierung und Elektrolyse (Installierte Elektrolyseleistung ca. 22 GW, Volllaststunden 2600 Stunden) erfolgt, basiert die Wasserstoffversorgung im Szenario 95 auf inländischen Elektrolyseanlagen (hauptsächlich im Norden Deutschlands, Elektrolyseleistung ca. 62 GW, Volllaststunden 2900 Stunden) sowie auf Importen. Etwa mehr als die Hälfte des benötigten Wasserstoffs wird importiert. Dies zeigt zum einen, dass die inländische Wasserstoffproduktion gegenüber Importen in Teilen wirtschaftlich ist. Zum anderen wird aber deutlich, dass der Import von Wasserstoff aus einer Kostenperspektive eine attraktive Option darstellt.

Die Umsetzung der CO₂-Reduktionsmaßnahmen ist mit erheblichen Kosten verbunden. Andererseits führen die Maßnahmen auch zu einer Einsparung fossiler Energieträger. Vergleicht man die Systemkosten für das Jahr 2050 mit den heutigen Kosten, errechnen sich für das Szenario 80 jährliche Mehrkosten in Höhe von ca. 49 Mrd. €. Für das Szenario 95 liegen die vergleichbaren Mehrkosten mit 128 Mrd. € mehr als doppelt so hoch. Bezogen auf das für 2050 angenommene Bruttoinlandsprodukt errechnen sich Anteile von 1,1% (Szenario 80) bzw. 2,8% (Szenario 95). Im Szenario 80 entfallen etwa 53% der Mehrkosten im Jahr 2050 auf den Verkehrssektor, während der Anteil für den Energiesektor gut 28% beträgt. Eine andere Verteilung zeigt sich im Szenario 95: Etwa 28% der Mehrkosten sind dem Verkehrssektor zuzuordnen. Absolut gesehen liegen sie aber deutlich über dem Wert des Szenario 80. Etwa 27% der Mehrkosten sind für den Ausbau erneuerbarer Energien im Umwandlungssektor notwendig und 21% müssen für die Herstellung bzw. den Import erneuerbarer Kraftstoffe (z.B. Wasserstoff und Power-to-Liquid) aufgewendet werden. Der Anteil von Mehrausgaben für den Aufbau der notwendigen Energieinfrastruktur (inkl. Speicher) beläuft sich im Szenario 95 auf etwa 12,6%. Für eine Bewertung einer Transformationsstrategie für den Zeitraum von heute bis 2050 sind die über diesen Zeitraum kumulierten Systemmehrkosten relevant. Für das Szenario 80 errechnen sich kumulierte Mehrkosten in Höhe von 655 Mrd. €. Im Szenario 95 liegen sie mit ca. 1850 Mrd. € um mehr als einen Faktor 3 höher. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich um die Kosten handelt, die für den Umbau der Energieversorgung notwendig sind. Nicht berücksichtigt sind volkswirtschaftliche Effekte, wie beispielsweise die zu erwartende Wertschöpfung oder mögliche Beschäftigungseffekte. Hierfür bedarf es einer volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, die im Rahmen dieser Analyse nicht durchgeführt wurde.

Fazit

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass bereits im Szenario 80 eine Vielzahl von Effizienzmaßnahmen wirtschaftlich attraktiv sind und auch im Szenario 95 eine wichtige Rolle spielen. Sie sind daher als besonders robuste Maßnahmen einzustufen. Allerdings verdeutlichen die Analysen ebenfalls, dass die Maßnahmenportfolios, die für das 80%- und das 95%-Reduktionsziel jeweils angemessen sind, sich in Teilen erheblich voneinander unterscheiden. So sind einige Maßnahmen zwar für ein Erreichen des 80%-Ziels hilfreich, für die Einhaltung eines 95%-Ziels sind Teile der 80%-Strategie allerdings jedoch nicht zielführend und unter Umständen sogar kontraproduktiv. Dies gilt insbesondere für Maßnahmen, deren Umsetzung auf fossilen Energieträgern basiert. Dies bedeutet, dass heute für mittelfristig geplante Maßnahmen dieser Kategorie bei einem 95%-Szenario die Gefahr besteht, als „stranded investments“ zu enden. Sowohl von der Bundesregierung als auch von der EU Kommission wurde die Absicht erklärt, bis zum Jahr 2050 Treibhausgasneutralität erreichen zu wollen. Vor diesem Hintergrund sollte eine Transformationsstrategie mindestens auf ein 95%-Reduktionsziel ausgerichtet werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch die Substitution fossiler Energieträger eine zunehmende Elektrifizierung in allen Endenergiesektoren erfolgt und die Kopplung der Sektoren deutlich zunimmt. Dies führt zu einer signifikanten Erhöhung des Stromverbrauchs, der im Szenario 95 um über 80% höher liegt als der heutige Stromverbrauch. In den Analysen wurde nicht untersucht, wie sich eine Substitution der heute eingesetzten Rohstoffe (nicht energetischer Verbrauch) in der chemischen Industrie auswirken würde. Berücksichtigt man diesen Verbrauch (vgl. hierzu [3]), dürfte der Stromverbrauch noch einmal signifikant steigen.

Eine CO₂ freie Stromerzeugung ist eine notwendige Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende. Rückgrat der zukünftigen Stromversorgung ist die Stromerzeugung auf der Basis von Windkraft, Photovoltaik und Bioenergie. Mit einem Anteil von 65% an der Stromerzeugung im Szenario 95 kommt der Windenergie eine Schlüsselstellung zu. Für die Realisierung der im Jahr 2050 notwendigen Kapazitäten sind alleine im Onshore-Bereich durchschnittliche jährliche Netto-Zubauraten von knapp 6 GW notwendig. Für die Realisierung dieses Zubaus bedarf es möglichst schnell klarer Rahmenbedingungen (z.B. Flächenplanung, Abstandsregelung, Vereinfachung von Genehmigungsverfahren). Gefragt sind hier politische Entscheidungsträger auf allen Ebenen.

Die Analysen zeigen, dass der Einsatz von Wasserstoff insbesondere im Szenario 95 eine wichtige Rolle spielt. Wasserstoff findet in vielfältigster Art und Weise Anwendung und trägt darüber hinaus aufgrund seiner Langzeitspeichereigenschaften maßgeblich zur Versorgungssicherheit (z.B. im Fall einer Dunkelflaute) bei. Die Analysen verdeutlichen, dass der Import von Wasserstoff (und auch von PtL-Kraftstoffen) eine kostengünstige Option ist. Eine ausschließlich aus nationaler Perspektive betrachtete Transformationsstrategie greift somit zu kurz. Vielmehr sind das europäische und globale Umfeld bzw. die entsprechenden neuen Energiemärkte in die Analysen miteinzubeziehen.

Die Umsetzung der Transformationsstrategien bedeutet auf der einen Seite eine Einsparung fossiler Energieträger und führt zu einer Reduktion der Energiekosten. Auf der anderen Seite sind die Investitionen für die vielfältigen Maßnahmen (z.B. Bau von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen, Effizienzmaßnahmen, Infrastrukturen etc.) gegenüberzustellen. Für eine Steigerung des CO₂-Reduktionsziels um 15 Prozentpunkte gegenüber einer 80% Strategie, sind Mehrkosten erforderlich, die um einen Faktor von mehr als 3 höher liegen. Diese Kosten sind letztlich von den Endverbrauchern zu tragen. Die Frage, ob Kosten in einer solchen Dimension getragen werden können, mag folgendes Beispiel verdeutlichen: Summiert man die Kosten der fossilen Energieträger, die in den letzten 15 Jahren nach Deutschland importiert wurden, errechnet sich ein Wert von ca. 1000 Mrd. €. Der Vergleich zeigt, dass die errechneten kumulierten Kosten durchaus mit heutigen Energiekostenkategorien vergleichbar sind. Die analysierten Transformationsstrategien lassen sich somit nicht nur technisch darstellen, sondern erscheinen auch aus einer volkswirtschaftlichen Perspektive realisierbar.

Autoren:

Dr. Peter Markewitz, Dr. Martin Robinius, Peter Lopion, M.Sc., Prof. Dr. Detlef Stolten,

Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- Klimaforschung (IEK-3): Technoökonomische Systemanalyse

Literatur/Anmerkungen

[1] Abschlussbericht der Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“, Januar 2019, www.bmwi.de

[2] Prognos AG, BCG: Klimapfade für Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI), Januar 2018, <https://bdi.eu/artikel/news/studie-zum-klimaschutz-kernergebnisse-der-klimapfade-fuer-deutschland/>

[3] DECHEMA, FutureCamp: Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Studie im Auftrag des Verbandes der chemischen Industrie (VCI), 2019, <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>

Weitere Informationen sowie ein Download der Studie finden Sie unter dem nachstehenden QR Code

