dena
Deutsche Energie-Agentur

dena-Leitstudie Integrierte Energiewende

Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050
Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen

Integrierte Energiewende

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **4**

Executive Summary **6**

1. Die Integrierte Energiewende als ganzheitlicher Ansatz **8**

2. Die zentralen Erkenntnisse der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende **12**

2.1 Welche Rahmenbedingungen und Investitionen benötigt eine integrierte Energiewende? 16

2.2 Wie und wann unterscheiden sich die Transformationspfade untereinander sowie mit Blick auf das 80- und 95-Prozent-Klimaziel? 19

2.3 Welche Bedeutung hat die Energieeffizienz für die Erreichbarkeit der Klimaziele? 21

2.4 Was kann und muss der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland leisten? 23

2.5 Welche Bedeutung haben erneuerbare synthetische Energieträger und Grundstoffe? 25

2.6 Wie lassen sich Versorgungssicherheit und Deckung der Nachfrage auch bei Dunkelflaute gewährleisten? 28

Diskurs: Versorgungssicherheit und Dunkelflaute 30

2.7 Wie wird sich die Energieinfrastruktur verändern? 32

2.8 Welche Stellschrauben beeinflussen die Energiewende im Verkehr? 34

Diskurs: Oberleitungshybrid-Lkw 37

2.9 Wie können Gebäude energieeffizienter und klimafreundlicher werden? 39

2.10 Welche Veränderungen sind im Industriesektor zu erwarten? 42

Diskurs: Carbon Capture and Storage (CCS) 44

2.11 Wie muss die Entwicklung in Deutschland in die internationale Energiewende eingebettet werden? 46

3. Struktur und Partnerkreis der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende **48**

Impressum **51**

Vorwort

Nach 18 Monaten intensiver Arbeit an der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende stellen wir in diesem Bericht nun unsere Ergebnisse vor. Mehr als 60 Studienpartner aus verschiedensten Branchen haben an der dena-Leitstudie mitgewirkt. Es hat eine Vielzahl von Analysen und Diskussionen gegeben – innerhalb der Studienpartner, mit einem in besonderer Weise engagiertem Beirat und vielen Akteuren in Politik und Zivilgesellschaft. Zusammen mit den wissenschaftlichen Gutachtern und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der dena waren insgesamt über 250 Personen beteiligt. Für dieses außerordentlich große Engagement und die hervorragende Arbeit danke ich allen sehr herzlich.

Unser gemeinsames Ziel war es, die bestmöglichen Transformationspfade zur Erreichung der Klimaziele zu identifizieren und diese mit praxistauglichen Hinweisen und Handlungsempfehlungen zu hinterlegen. Zugleich wollten wir Marktkenntnisse und Kompetenzen all derjenigen berücksichtigen, die diese Transformationsprozesse mit ihren Unternehmen am Ende gestalten müssen.

Die Arbeit hat sich gelohnt. Wir können mit bestem Gewissen sagen, dass dieses Studienprojekt neue Maßstäbe für den energie- und klimapolitischen Diskurs setzt. Es kann Pflichtlektüre für all diejenigen sein, die in den verschiedenen von der Bundesregierung eingesetzten Kommissionen an den nötigen Maßnahmen zur Zielerreichung arbeiten.

Im Laufe der 18 Monate ist den Beteiligten klargeworden: Die Integrierte Energiewende beinhaltet viel mehr als Sektorkopplung. Es geht um das komplexe Zusammenspiel von verschiedenen Infrastrukturen und Märkten, von Kundenverhalten, regulatorischen Rahmenbedingungen und einer Vielzahl neuer Technologien und Geschäftsmodelle, die über die einzelnen Sektoren hinweg wirken. Das heißt auch: Wir müssen uns von manchen, eher einfachen Vorstellungen aus der Vergangenheit verabschieden. Energiewende muss grundsätzlich neu gedacht werden, insbesondere der gegenwärtige politische Rahmen.

Energiewende und Klimaschutz sind Fortschrittsprojekte, die eine Vielzahl von Chancen und neuen Möglichkeiten bieten. Es gilt aber auch viele Schwierigkeiten zu überwinden, über die man nicht hinwegschauen kann. Die Zielerreichung ist alles andere als ein Selbstläufer. Im Gegenteil: Wenn wir in Deutschland nicht endlich neuen Schwung aufnehmen, droht das Scheitern. Dann werden andere Länder die Chancen nutzen. Und den Strukturwandel müssen wir dennoch gestalten, weil Energiewende und Klimaschutz längst ein globales Handlungsfeld sind.

Mit der dena-Leitstudie wollen wir nicht sagen: So und nicht anders muss es sein. Die Aufgabe ist viel zu komplex, als dass ein Studienprojekt – sei es auch noch so gut – eine alleinige Lösung vorgeben könnte. Mit der Auswahl der Szenarien und dem innovativen systemischen Ansatz, den wir verfolgt haben, geben wir aber neue Orientierung und ein brauchbares Fundament für künftige Diskussionen und Entscheidungen.

Diese Studie kann Grundlage für einen Neustart in der Energiewende- und Klimaschutzpolitik sein. Wir werden den weiteren Weg intensiv verfolgen und uns munter in die Diskussion einbringen. Und all jenen, die in Zukunft wichtige Entscheidungen treffen müssen, sei gesagt: Ohne Mut und Entschlossenheit wird es nicht gehen. Und nein, Leichtsinn darf es auch nicht sein. Aber mit der richtigen Portion Urteilskraft können wir viel erreichen. Davon bin ich überzeugt.

Herzlichst Ihr

Andreas Kuhlmann
Vorsitzender der Geschäftsführung
der Deutschen Energie-Agentur (dena)

Executive Summary

dena-Leitstudie verbindet energiewirtschaftliche Analyse mit umfassendem Diskurs

Die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende entwickelt und vergleicht für das Energiesystem in Deutschland Transformationspfade zur Erreichung der klimapolitischen Ziele bis 2050. Sie verfolgt einen innovativen, sektorübergreifenden Szenarioansatz. Zugleich baut sie auf dem Branchenwissen von über 60 Studienpartnern aus allen relevanten Sektoren und dem kontinuierlichen Austausch mit wesentlichen Akteuren aus Politik, Gesellschaft und Wissenschaft auf. Ziel ist es, die energiewirtschaftlichen Analysen durch Einschätzungen zu Umsetzungsherausforderungen und gesellschaftliche Fragestellungen zu überprüfen und zu ergänzen.

Mit erhöhten Anstrengungen in allen Sektoren lassen sich die Ziele von Paris erreichen

Eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 80 Prozent und auch um 95 Prozent bis 2050 ist grundsätzlich erreichbar. Dies setzt aber deutlich weiter gehende Maßnahmen als bisher geplant in allen Sektoren voraus, befördert durch ein hohes Engagement aller Beteiligten, passende politische Rahmenbedingungen sowie einen Diskurs über die Verteilung der Kosten der Energiewende. Ein „Weiter so“ reicht nicht aus: Selbst bei einer anspruchsvollen Fortschreibung aktueller Entwicklungen, beispielsweise beim Zubau der erneuerbaren Energien, würde nur eine Treibhausgasminderung von rund 62 Prozent im Jahr 2050 erreicht. Da sich die möglichen Transformationspfade und damit verbundene Treibhausgasminderungen in den Sektoren bereits 2030 deutlich unterscheiden und der obere Rand des Korridors sehr weitreichende Strategien erfordert, muss in dieser Legislaturperiode eine Entscheidung zu den angestrebten Klimazielen fallen. Nur so kann in den einzelnen Sektoren rechtzeitig die Entwicklung und breite Markteinführung der notwendigen neuen Technologien starten.

Ein breiter Energieträgermix ermöglicht kostengünstigere und robustere Transformationspfade

Die in der dena-Leitstudie untersuchten Transformationspfade mit einem breiten Technologie- und Energieträgermix sind bis 2050 unter den getroffenen Annahmen um bis zu 600 Milliarden Euro kostengünstiger als solche, die verstärkt auf strombasierte Anwendungen setzen. Eine Nutzung der bestehenden Energieinfrastrukturen in ihrer Vielfalt ermöglicht bei diesen Pfaden flexiblere Lösungsansätze wie etwa das Aufgreifen von Technologieentwicklungen bis 2050, die heute noch nicht absehbar sind.

Der Ausbau und die Integration erneuerbarer Energien müssen forciert werden

Bis 2050 ist ein Nettozubau erneuerbarer Energien von durchschnittlich bis zu 8,5 Gigawatt jährlich (GW/a) erforderlich. Dafür müssen der bestehende Ausbaukorridor erweitert und die benötigten Flächen in den Bundesländern auch wirklich zur Verfügung stehen. Eine Weiterentwicklung von Marktdesign und Netzregulierung ist die Basis für eine optimierte Systemintegration erneuerbarer Energien regional und überregional.

Synthetische erneuerbare Energieträger ergänzen Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien

Eine Senkung des Endenergieverbrauchs durch umfassende Energieeffizienzanstrengungen in allen Sektoren (Effizienzgewinne allein in der Industrie 26 bis 33 Prozent bis 2050) sowie der Ausbau erneuerbarer Energien sind Grundvoraussetzung zur Erreichung der Klimaziele. Dritter entscheidender Faktor sind synthetische erneuerbare Energieträger, die zum Großteil nach Deutschland importiert werden. Sie decken im Jahr 2050 zwischen 150 und 900 Terawattstunden jährlich (TWh/a) in allen Anwendungsbereichen ab, die sich durch eine direkte Nutzung erneuerbaren Stroms nicht oder nur schwer von Emissionen befreien lassen. Diese „Green PowerFuels“ schließen zugleich Lücken, die perspektivisch durch Umsetzungshemmnisse entstehen können (zum Beispiel Akzeptanz für neue Windenergieanlagen).

Ein verlässlicher Planungshorizont macht aus dem erforderlichen Strukturwandel eine Modernisierungschance

Der mit der Transformation verbundene Strukturwandel betrifft neben den vieldiskutierten Veränderungen in der Kohlewirtschaft perspektivisch auch viele weitere Branchen und Industriezweige. So bringen ambitionierte Klimaziele etwa für die chemische Grundstoffindustrie grundlegende Veränderungen in einem heute hochgradig integrierten Wertschöpfungsnetzwerk. In der Automobilindustrie wird sich die Veränderung der Antriebstechnologien nicht nur auf die großen Automobilhersteller, sondern auch auf eine Vielzahl kleiner und mittlerer Unternehmen der Zulieferindustrie auswirken.

Es braucht deshalb politische Rahmenbedingungen, die langfristig verlässliche Anreize zur CO_2-Vermeidung setzen und eine technologieoffene wie innovative Optimierung über Sektorengrenzen hinweg durch den Markt ermöglichen. Die erforderlichen Grundsatzentscheidungen zu Energieinfrastrukturen müssen rechtzeitig getroffen werden, beispielsweise zur Weiterentwicklung der Gasinfrastruktur oder zum Aufbau einer Infrastruktur für Oberleitungshybrid-Lkw.

Gebäudebestand und Energiesektor benötigen die höchsten Investitionen

Eine erfolgreiche Energiewende erfordert in den nächsten drei Jahrzehnten kontinuierlich hohe Investitionen durch alle Gebäudeeigentümer in die Sanierung des Gebäudebestands, verbunden mit einer Steigerung der Sanierungsrate von bisher 1,0 auf mindestens 1,4 Prozent. Um diese Investitionsdynamik zu stimulieren und zu verstetigen, braucht es einen auf Anreize setzenden sorgfältig gewählten Instrumentenmix, der Förderung gegenüber ordnungsrechtlichem Zwang betont, laufend überprüft und nötigenfalls angepasst werden muss.

Für ein effizientes Stromsystem mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien werden umfangreiche Ausgleichseffekte innerhalb Deutschlands und im europäischen Verbundnetz erforderlich. Dafür muss über die bestehende Netzentwicklungsplanung bis 2030 hinaus in das Übertragungs- wie das Verteilnetz investiert werden. Neben einem kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien sind im Abgleich mit den europäischen Nachbarn auch Neuinvestitionen in Gaskraftwerke nötig. Sie gewährleisten die Versorgungssicherheit, wenn die gesicherte Leistung aus Kernkraftwerken nicht mehr und aus Kohlekraftwerken nur noch in geringem Umfang zur Verfügung steht.

Die Verkehrswende fußt auf mehreren Säulen

Die Elektrifizierung der Antriebe ist ein wesentlicher Treiber der Verkehrswende – aber nicht ihr einziger. Ein entscheidender Hebel ist die Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs der Verkehrsmittel, um den Energieverbrauch zu senken und den Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor deutlich zu erhöhen. Strom wie gasförmige und flüssige Kraftstoffe müssen perspektivisch zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energieträgern basieren. Parallel dazu sind neue Mobilitätsstrategien erforderlich, um den weiteren Anstieg der Verkehrsleistung zu bremsen und das Verkehrsaufkommen im besten Fall sogar absolut zu senken. Verkehrs-, Energie- und IT-Infrastruktur müssen insgesamt deutlich intensiver über die Sektoren integriert geplant und die Abgaben- sowie Steuersystematik an den Energiewendezielen ausgerichtet werden.

Eine erfolgreiche Energiewende ist eingebettet in die internationalen Entwicklungen

Ein nachhaltiges Energiesystem in Deutschland benötigt die Ausgleichsmöglichkeiten eines weiterentwickelten europäischen Strombinnenmarkts, einen internationalen Handel für synthetische erneuerbare Energieträger und die weitere Kostendegression bei zentralen Energiewendetechnologien durch globale Nachfrage.

Die Energiewende kann nur gelingen, wenn sie auch industrie- und wirtschaftspolitisch ein Erfolg ist. Dafür braucht es einerseits Instrumente zum Schutz der deutschen Industrie vor Wettbewerbsnachteilen aufgrund im internationalen Vergleich höherer deutscher Klimaschutzanforderungen (Carbon-Leakage-Schutz) und internationale Vereinbarungen für den globalen Handel. Andererseits bietet der weltweit wachsende Bedarf an Energiewendetechnologien auch Exportchancen für die deutsche Wirtschaft.

Entscheidungsspielräume und Teilhabe fördern gesellschaftliche Akzeptanz

Die nächste Phase der Energiewende wird die Bürger stärker als heute berühren – durch Verteilungsfragen bei den Energiewendekosten, durch den Strukturwandel und dessen Auswirkungen auf das eigene Arbeits- und Lebensumfeld. Sie sind herausgefordert, die erforderlichen Investitionen im privaten Bereich aufzubringen und die Veränderungen bei Energieanwendungen, beispielsweise in der Mobilität, anzunehmen und zu forcieren. Aufgabe der Politik ist es hierbei, die Chancen des Großprojekts Energiewende kontinuierlich nachzuverfolgen und aufzuzeigen. Die Bürger selbst benötigen ausreichend Handlungsfreiräume sowie Beteiligungs- und Gestaltungsmöglichkeiten für ihre Investitionsentscheidungen.

1. Die Integrierte Energiewende als ganzheitlicher Ansatz

Die dena-Leitstudie arbeitet mit dem Leitbegriff der integrierten Energiewende. Integrierte Energiewende bedeutet, dass die verschiedenen technischen Anlagen, Infrastrukturen und Märkte aus den unterschiedlichen Sektoren Energie, Industrie, Gebäude und Verkehr aufeinander abgestimmt und in ein optimiertes und intelligentes Energiesystem überführt werden. Diese Integration findet in Balance zwischen lokaler, regionaler und überregionaler Ebene statt. Zudem müssen Märkte und Infrastrukturen gemeinsam betrachtet und aufeinander abgestimmt werden.

Die dena-Leitstudie verfolgt unter diesem Leitbegriff eine ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems und einen gesellschaftlich breiten Dialog über realistische Transformationspfade.

Sektoren im Wandel und mit zunehmend weniger deutlichen Grenzen

Jeder Sektor ist durch eigene Merkmale und Rahmenbedingungen charakterisiert: Die spezifischen Technologien, Infrastrukturen und Märkte sind innerhalb des jeweiligen Sektors abgestimmt und optimiert. Rechtliche Rahmenbedingungen sind über Jahrzehnte mit den Sektoren gewachsen und haben diese geprägt. Geschäftsmodelle und Wertschöpfungsketten haben sich sektorspezifisch entwickelt. Auch die Kundenanforderungen und -erwartungen sind je nach Sektor unterschiedlich und von verschiedenen soziologischen Faktoren beeinflusst. All dies trägt dazu bei, dass jeder Sektor anders funktioniert.

Mit der Energiewende wirken neue, starke Veränderungskräfte auf die gewachsenen Strukturen. Der Ausbau der erneuerbaren Energien, insbesondere im Stromsektor, erhöht den Bedarf an Flexibilität im System. Die Erzeugung richtet sich nicht mehr allein nach dem Verbrauch, der Verbrauch reagiert auch auf Schwankungen in der Erzeugung. Wer seine Stromnachfrage an die Lage im Stromnetz anpasst, kann seine Flexibilität zur Dienstleistung machen – sei es mit einer Produktionsanlage, einem Wärmespeicher oder einem Elektrofahrzeug. Immer mehr Verbraucher verfügen auch über dezentrale Erzeugungsanlagen und können selbst Energie ins System einspeisen. So werden etwa Gebäude immer mehr zu Einheiten, die Energie nicht nur verbrauchen, sondern auch erzeugen, speichern und abgeben.

Die Digitalisierung macht es möglich, verschiedene Komponenten in Erzeugung und Verbrauch zu steuern und aufeinander abzustimmen – auch über die Grenze des eigenen Betriebs oder Hauses hinweg. In allen Sektoren können Daten über Verbrauchsmuster die Grundlage für neue Geschäftsmodelle schaffen. Algorithmen erlauben es, den Betrieb technischer Anlagen intelligent zu steuern, zum Nutzen der Eigentümer wie zur Verbesserung der Stabilität und Effizienz des Gesamtsystems. Dadurch verändern sich die klassischen Wertschöpfungsketten der Energiewirtschaft, neue Wertschöpfungsnetzwerke entstehen – über Sektorgrenzen hinweg.

Die Sektoren, wie wir sie kennen, verändern sich. Grenzen weichen auf, die Interaktion steigt. Der Begriff Sektorkopplung greift deshalb zu kurz. Er vermittelt den Eindruck, als ginge es nur darum, bestehende und in sich geschlossene Einheiten miteinander zu verbinden. Es geht vielmehr darum, die steigende Zahl an Komponenten des Energiesystems aus allen Sektoren in einem System zu integrieren, Wechselwirkungen zu erkennen, Optimierungs- und Innovationspotenziale zu nutzen, Märkte und Infrastrukturen weiterzuentwickeln. Deshalb würde es auch zu kurz greifen, die Herausforderungen aus der Sicht einzelner Sektoren anzugehen. Um die Klimaziele zu erreichen, braucht es einen ganzheitlichen, sektorübergreifenden Ansatz. Dafür steht der Begriff Integrierte Energiewende.

Integration auf mehreren Ebenen von lokal bis international

Für eine erfolgreiche integrierte Energiewende sind alle Handlungsebenen wichtig: von einzelnen Anlagen zur Energieerzeugung, -umwandlung und -speicherung über Verbrauchsanlagen bis hin zu Gebäuden und lokalen Quartieren. Von der Stadtebene zur Region und dem überregionalen Ausgleich bis zum nationalen Energiesystem und der Integration in die internationalen Märkte und Strukturen. Bereits hier bieten sich viele Anknüpfungspunkte, die für das Erreichen der Klimaziele essenziell sind. So können lokale Kooperationen zwischen Unternehmen oder das Quartiersmanagement dazu beitragen, kleinteilige, aber wichtige Aspekte der integrierten Energiewende umzusetzen. Auch auf regionaler Ebene bieten sich große Potenziale, beispielsweise in der Zusammenarbeit von Städten mit den umgebenden ländlichen Räumen zur Nutzung erneuerbarer Energien.

Die Betrachtung der vielfältigen Handlungsoptionen ist bereits auf nationaler Ebene komplex. Integrierte Energiewende muss aber auch die europäische und globale Ebene im Blick haben. Die europäischen Energiemärkte sind miteinander verbunden. Ihre Wechselwirkungen dürften mit dem weiteren Ausbau des EU-Energiebinnenmarkts eher zu- als abnehmen. Diese europäischen Energiemärkte und -infrastrukturen, aber auch die globalen Märkte und Handelsbeziehungen bieten besondere Chancen zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende: durch die günstige Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien und die Bereitstellung von Ausgleichseffekten sowie den gemeinsamen Ansatz zur Verbesserung der Versorgungssicherheit.

Darüber hinaus können die globalen Entwicklungen nicht außen vor bleiben. Wichtige Einflussfaktoren sind etwa die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie oder schlicht die Technologieentwicklung.

Die integrierte Optimierung von Markt und Netz

Integrierte Energiewende braucht insbesondere eine Optimierung von Märkten und Infrastrukturen. So muss beispielsweise beim weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien auch die notwendige Infrastruktur für den Transport zur Verfügung stehen. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Verschmelzung der unterschiedlichen Sektoren werden sich auch ihre bisher getrennten Märkte immer stärker annähern. Infrastrukturen müssen optimiert gedacht werden, damit alle Sektoren auf die für sie notwendigen Strukturen und Energieträger zurückgreifen können.

Integrierte Energiewende verbindet somit nicht nur bislang getrennte Sektoren und Energieinfrastrukturen. Sie verbindet auch unterschiedliche Handlungsebenen – von lokal über national und europäisch bis global. Und sie verbindet die in all diesen Sektoren und Ebenen aktiven Akteure und gibt ihnen häufig neue Rollen. Daraus entstehen auch vielfältige neue Möglichkeiten und Chancen für neue Geschäftsmodelle.

Wechselwirkungen im integrierten Energiesystem

Durch die ganzheitliche Betrachtung des Energiesystems werden komplexe Wechselwirkungen erkennbar. Das zeigt das Beispiel der zunehmenden Elektrifizierung in allen Sektoren. Erneuerbare Energien lassen sich am stärksten im Stromsystem ausbauen. Wind- und Solarkraftwerke spielen dabei die Hauptrolle. Dieser Strom sollte so effizient wie möglich genutzt werden. Strombasierte Anwendungen nehmen zu, beispielsweise in der Industrie durch Elektrolichtbogenöfen oder verschiedene elektrolysebasierte Verfahren, in Gebäuden durch Wärmepumpen, im Verkehr durch Elektrofahrzeuge. Doch die Elektrifizierung stößt auch an ihre Grenzen. Nicht alle Prozesse in der Industrie lassen sich elektrifizieren. In Gebäuden steigt der Sanierungsbedarf zusätzlich, weil Wärmepumpen mit niedrigen Versorgungstemperaturen und kleinen Temperaturdifferenzen arbeiten und daher für einen effizienten Betrieb eine hohe thermische Qualität der Gebäudehülle wichtig ist. Im Verkehrsbereich bestehen große Herausforderungen im Güterstraßenfernverkehr sowie bei der Schiff- und Luftfahrt. Hier ergeben sich viele Fragen zum Einsatz und Verhältnis von Strom, gasförmigen und flüssigen Energieträgern im Energiesystem der Zukunft.

Für Lkw wäre eine Elektrifizierung mithilfe von Oberleitungen technisch möglich. Aber lohnt sich der Aufbau dieser Elektrifizierungsinfrastruktur im Verkehrssektor? Wie sinnvoll ist es, ambitioniertere Ziele für die Gebäudesanierungsrate auszurufen, wo selbst die bisherige Zielmarke seit Jahren weit verfehlt wird? Wie und wo muss das Energiesystem ausgebaut werden, um den zusätzlichen Strombedarf zu decken? Wie reagiert das System in Extremsituationen wie Jahreshöchstlast, also dem Zeitpunkt der höchsten Nachfrage im Jahr, oder Dunkelflaute, wenn kaum Wind- oder Solarstrom zur Verfügung stehen? Was ist unter dem Begriff „Dunkelflaute“ überhaupt zu verstehen und wie weit kann, wie weit soll das System dagegen abgesichert sein? Wie entwickeln sich die Infrastrukturen für gasförmige oder flüssige Energieträger, wenn sich ihre Auslastung verändert? Und ist es vielleicht an manchen Stellen praktikabler, kostengünstiger und für die Stabilität des Systems nützlicher, erneuerbaren Strom doch nicht direkt, sondern für die Erzeugung von synthetischen Energieträgern zu nutzen? Diese und weitere Fragen untersucht die dena-Leitstudie in ihren verschiedenen Szenarien.

Gesellschaftliche Akzeptanz als Zielfaktor

Neben der Maxime der möglichst effizienten und umweltschonenden Nutzung von Energie kommen weitere Faktoren ins Spiel: wirtschaftliche Kosten, Versorgungssicherheit und nicht zuletzt gesellschaftliche Akzeptanz. Präsent sind bereits heute Einwände gegen die Errichtung von Windkraftanlagen oder Stromübertragungsleitungen. Auch die Bereitschaft oder Möglichkeit zu Investitionen in neue, energieeffiziente Technik ist bei Unternehmen, Kommunen und Privatpersonen nicht selbstverständlich, obwohl sich Investitionen in Energieeffizienz meist früher oder später durch die eingesparten Energiekosten wirtschaftlich rechnen – sei es die Modernisierung einer Produktionsanlage, die Sanierung eines Gebäudes oder die Anschaffung eines sparsamen Haushaltsgeräts oder Fahrzeugs. Auf die Realisierbarkeit einzelner Transformationspfade hat das erhebliche Auswirkungen. Die dena-Leitstudie berücksichtigt deshalb gesellschaftliche Akzeptanz als vierten Zielfaktor, zusätzlich zu den etablierten Zielfaktoren Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit.

Integrierte Energiewende im Dialog

Für den ganzheitlichen Ansatz der integrierten Energiewende müssen Ausgangsituationen, Anforderungen und Möglichkeiten in verschiedenen Dimensionen optimiert werden. Das führt zu vielen Abhängigkeiten und einer sehr hohen Komplexität. Bewertungen aus Sicht eines einzelnen Sektors oder einer einzelnen Branche reichen nicht aus. Es braucht einen Erkenntnisprozess im interdisziplinären, branchenübergreifenden Diskurs und große Offenheit gegenüber künftigen Entwicklungen. Aufgrund der hohen Dynamik der Energiewende ist es wichtig, dass alle Beteiligten auf Veränderungen in der Denkweise und in den Prozessen flexibel reagieren. Die dena-Leitstudie ist selbst ein Beispiel für solch einen breiten Dialog, in dem Fachakteure über die Grenzen von Branchen und Sektoren hinweg bereit sind, voneinander zu lernen und die Dinge zwar aus ihrer Perspektive, aber mit Rücksicht auf das System zu denken. Sie ist kein reines Forschungs- und Studienprojekt. Sie baut bewusst auf das Branchenwissen von über 60 Studienpartnern aus allen relevanten Sektoren und den kontinuierlichen Dialog mit Akteuren aus Politik, Gesellschaft und Wissenschaft auf. Auch die Aufbereitung der Ergebnisse und Impulse ist so angelegt, dass sie möglichst zu weiteren Diskussionen anregt.

Szenarioanalyse statt Optimierungsanalyse

Zum dialogorientierten Ansatz der dena-Leitstudie gehört auch, dass sie verschiedene Transformationspfade als Handlungsoptionen zur Diskussion stellt. Die durchgeführten quantitativen Analysen sind keine umfassende Optimierungsanalyse, bei der alle angebots- und nachfrageseitigen Merkmale in einem mathematischen Modell abgebildet und ausgleichschaffende Strukturen in gegenseitigen Wechselwirkungen auf einen bestimmten Zielpunkt hin optimiert werden.

Maßgabe war nicht, den einen optimalen Pfad zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende zu ermitteln und für Politik und Wirtschaft detailliert als Roadmap zu beschreiben. Vielmehr handelt es sich bei der dena-Leitstudie um eine Szenarioanalyse. Zu Beginn wurden mit den Partnern grundsätzliche Szenarien abgestimmt und dann je Studienmodul spezifische Transformationspfade entwickelt, die jeweils ein Szenario mit seinen Anforderungen und den damit verbundenen Klimazielen erreichen. Anhand dieser Pfade wurde analysiert, mit welchen Anwendungen, Technologien und Energieträgern sich die Klimaziele erreichen lassen. Mit dieser Herangehensweise ließ sich das Know-how der Studien- und Modulpartner bestmöglich einbinden und Transformationspfade entwickeln, die als realisierbar eingeschätzt wurden.

Die Systemgrenzen der dena-Leitstudie

Die dena-Leitstudie verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, aber sie kann natürlich nicht alle Aspekte umfassend untersuchen. Wie bei jeder Studie ist es wichtig, die Systemgrenzen zu kennen und zu benennen. Nur dann lassen sich die gemachten Aussagen mit der ihnen zustehenden Bedeutung verstehen. Und gleichzeitig lässt sich daraus ableiten, zu welchen Fragen sich nachfolgende, weiter gehende Untersuchungen anbieten.

Die Bilanzierung aller Treibhausgasemissionen erfolgt in der dena-Leitstudie – wie international üblich und wie beispielsweise beim Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung – nach dem sogenannten Quellprinzip. Das Quellprinzip besagt, dass Emissionen dort ausgewiesen werden, wo sie entstehen. Im Rahmen unserer Studie werden somit diejenigen Emissionen bilanziert, die innerhalb der nationalen (das heißt territorialen) Grenzen Deutschlands entstanden sind. Zudem werden die Emissionen in demjenigen Sektor ausgewiesen, in dem die Verbrennung und damit die Freisetzung von Treibhausgasen stattfindet. Je stärker das Energiesystem integriert ist und die Sektoren verbunden sind, desto fraglicher ist, ob das Quellprinzip seinen Zweck erfüllt. Ein Beispiel sind importierte Brenn- und Kraftstoffe, die mithilfe von erneuerbaren Energien unter Verwendung von CO_2 aus der Luft oder aus CO_2-haltigen Abgasen synthetisch erzeugt werden. Abweichend vom Quellprinzip werden Emissionen aus der Verbrennung solcher importierten Green PowerFuels in der dena-Leitstudie als klimaneutral betrachtet, da es sich um einen Kohlenstoffkreislauf handelt: Die Emissionen, die bei der Verbrennung entstehen, wurden zuvor an einer anderen Stelle aus der Atmosphäre entnommen. Folglich gehen synthetische Brennstoffe mit einem CO_2-Faktor von null in die nationale CO_2-Bilanzierung ein.

Eine wichtige Grenze der Studie besteht bezüglich der möglichen Aussagen zu den Kosten der Energiewende. Untersucht wurden die Mehrkosten verschiedener Transformationspfade im Energiesektor und in den energieverbrauchenden Sektoren zum Erreichen der Klimaziele im Vergleich zu einem nicht zielerreichenden Referenzszenario. Auf dieser Basis können die Transformationspfade bewertet und verglichen werden, es können aber keine Aussagen zum Kostenoptimum des Gesamtsystems gemacht werden.

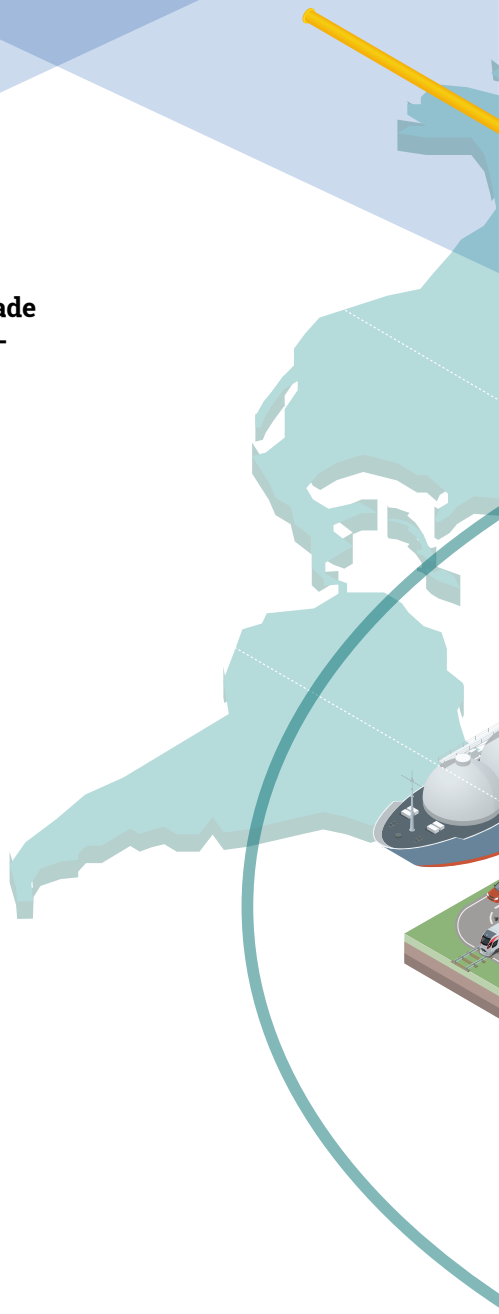
Es war im Rahmen der dena-Leitstudie außerdem nicht möglich, die Investitionen im Industriesektor realistisch abzuschätzen. Zum einen sind die Anlagen im industriellen Bereich meist sehr individuell ausgelegt; es lassen sich deshalb kaum Standardinvestitionskosten bestimmen. Zum anderen handelt es sich teilweise um Technologien, die noch zu entwickeln sind oder deren weitere Entwicklung mit Unsicherheiten behaftet ist. Eine wissenschaftlich fundierte Benennung der notwendigen Investitionskosten ist nicht möglich. Ebenso wenig können im Rahmen der Studie Aussagen über die positiven volkswirtschaftlichen Effekte einer erfolgreichen Energiewende getroffen werden, beispielsweise wie viele Arbeitsplätze durch die Investitionen entstehen, wie sich die Wertschöpfung der deutschen Industrie entwickelt oder welche Folgekosten für Mensch und Umwelt vermieden werden.

Alle ermittelten Kosten zur Transformation des Energiesystems wurden aus volkswirtschaftlicher Perspektive betrachtet. Es wurde nicht geprüft, ob sich Maßnahmen aus einzelwirtschaftlicher Perspektive lohnen und welche Verteilungswirkungen entstehen. Für eine Bewertung der Transformationspfade und deren gesellschaftlicher und gesamtwirtschaftlicher Wirkungen müssen sich weitere Studien anschließen. Hierin könnten dann die betriebswirtschaftliche Umsetzung der Transformation und die konkreten Auswirkungen auf die Bürger, speziell auf die Wohn- und Energiekosten, aber auch zu Beschäftigungseffekten und inländischer Wertschöpfung, untersucht werden. Solch eine weiterführende Analyse wäre maßgeblich für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende, die letztlich durch die Einzelakteure, also durch die Unternehmen und privaten Verbraucher vollzogen wird.

Die dena-Leitstudie soll dazu anregen, den Ansatz der integrierten Energiewende weiterzuverfolgen – auch und gerade dort, wo sich weiterer Diskussions- und Forschungsbedarf abzeichnet. Je breiter und vielseitiger der Dialog, desto eher wird es möglich sein, eine gemeinsame Entscheidung über Deutschlands Transformationspfad zu finden.

2. Die zentralen Erkenntnisse der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende

1. Welche Rahmenbedingungen und Investitionen benötigt eine integrierte Energiewende?
2. Wie und wann unterscheiden sich die Transformationspfade untereinander sowie mit Blick auf das 80- und 95-Prozent-Klimaziel?
3. Welche Bedeutung hat die Energieeffizienz für die Erreichbarkeit der Klimaziele?
4. Was kann und muss der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland leisten?
5. Welche Bedeutung haben erneuerbare synthetische Energieträger und Grundstoffe?
6. Wie lassen sich Versorgungssicherheit und Deckung der Nachfrage auch bei Dunkelflaute gewährleisten?
7. Wie wird sich die Energieinfrastruktur ändern?
8. Welche Stellschrauben beeinflussen die Energiewende im Verkehr?
9. Wie können Gebäude energieeffizienter und klimafreundlicher werden?
10. Welche Veränderungen sind im Industriesektor zu erwarten?
11. Wie muss die Entwicklung in Deutschland in die internationale Energiewende eingebettet werden?



2050
DAS KLIMAFREUNDLICHE UND
INTEGRIERTE ENERGIESYSTEM
DER ZUKUNFT

Die zentralen Erkenntnisse der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, seine nationalen Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Gleichzeitig zählt Deutschland zu den Unterzeichnern des Abkommens von Paris, welches darauf abzielt, die Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Niveau auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen, möglichst auf 1,5 °C.

Ziel der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende ist es, gemeinsam mit der Expertise der mehr als 60 Studienpartner aus vielen relevanten Branchen realistische Transformationspfade zur Erreichung des Zielkorridors für 2050 zu entwickeln und diese durch die wissenschaftlichen Gutachter in einer sektorübergreifenden, energiewirtschaftlichen Modellierung zu bewerten.

Hierfür wurden vier Szenarien in zwei Gruppen untersucht, die die Erreichung der deutschen Klimaziele bis 2050 zum Gegenstand hatten. Zusätzlich wurde ein Referenzszenario ohne Klimazielvorgabe als Vergleichsbasis modelliert.

Dieses Kapitel fasst die zentralen Erkenntnisse der dena-Leitstudie in „11 Fragen zur Energiewende“ zusammen. Sie bilden den bei einzelnen Themen sehr intensiv – und teilweise auch kontrovers – geführten Diskurs ab, der unter Moderation der dena im Kreis der Studienpartner sowie im kontinuierlichen Austausch mit wesentlichen weiteren Akteuren aus Politik, Gesellschaft und Wissenschaft geführt wurde. Zudem sind für jede Frage konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet, die aus Sicht der dena und der Studienpartner zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende notwendig sind.

Die Klimazielszenarien: Elektrifizierung und Technologiemix jeweils mit 80- oder 95-Prozent-Klimaziel

Sie beschreiben die Wege hin zu einem neuen, klimafreundlichen Energiesystem, in dem die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 beziehungsweise 95 Prozent im Vergleich zu 1990 sektorenübergreifend reduziert werden.

Referenzszenario (RF)

Das Referenzszenario (RF) wurde als Vergleich ohne Klimazielvorgabe modelliert. Es nimmt eine Fortschreibung der aktuellen Politik- und Technologieentwicklungen bis 2050 an, allerdings auf einem durchaus ambitionierten Niveau. Es setzt moderate Annahmen für CO_2-Zertifikatspreise. In der Modellierung wird kein Ziel zur Treibhausgasminderung vorgegeben.

Elektrifizierungsszenario (EL80)

mit 80-Prozent-Klimaziel

Das Elektrifizierungsszenario mit 80-Prozent-Klimaziel geht von der Steigerung der Energieeffizienz und einer breiten Elektrifizierung in allen Sektoren aus, was zu einer deutlichen Zunahme der Stromnachfrage führt. Synthetisch erzeugte Energieträger werden berücksichtigt, wenn sie zwingend erforderlich werden. Das Szenario wird mit Blick auf das Ziel einer Reduktion von 80 Prozent der Treibhausgase im Vergleich zu 1990 analysiert.

Elektrifizierungsszenario (EL95)

mit 95-Prozent-Klimaziel

Das Elektrifizierungsszenario mit 95-Prozent-Klimaziel geht von der Steigerung der Energieeffizienz und einer breiten Elektrifizierung in allen Sektoren aus, was zu einer weiteren Zunahme der Stromnachfrage führt. Synthetisch erzeugte Energieträger werden berücksichtigt, wenn sie zwingend erforderlich werden. Das Szenario wird mit Blick auf das Ziel einer Reduktion von 95 Prozent der Treibhausgase im Vergleich zu 1990 analysiert.

Technologiemixszenario (TM80)

mit 80-Prozent-Klimaziel

Das Technologiemixszenario mit 80-Prozent-Klimaziel nimmt ebenfalls die Steigerung der Energieeffizienz an, lässt jedoch bewusst eine breitere Variation bei den eingesetzten Technologien und Energieträgern zu. Das Szenario wird in der Modellierung hinsichtlich einer Reduktion von 80 Prozent der Treibhausgase im Vergleich zu 1990 analysiert.

Technologiemixszenario (TM95)

mit 95-Prozent-Klimaziel

Das Technologiemixszenario mit 95-Prozent-Klimaziel legt ebenfalls die Steigerung der Energieeffizienz zu Grunde, lässt jedoch bewusst eine breitere Variation bei den eingesetzten Technologien und Energieträgern zu. Das Szenario wird in der Modellierung hinsichtlich einer Reduktion von 95 Prozent der Treibhausgase im Vergleich zu 1990 analysiert.

2.1 Welche Rahmenbedingungen und Investitionen benötigt eine integrierte Energiewende?

Die Energiewende ist ein gesamtgesellschaftliches Projekt von enormer Tragweite und Komplexität. Das zeigt sich insbesondere bei dem gegenwärtigen Regelwerk und den dort formulierten Rahmenbedingungen. Es ist charakterisiert durch eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen, die kontinuierlich nachgebessert und verfeinert werden. Diese Praxis fortwährender Detailkorrekturen gibt jedoch keine hinreichenden Impulse, um die Energie- und Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen. Dazu braucht es eine umfassendere, tragfähige politische Strategie.

Technologiemix und Planungssicherheit gewährleisten

Die dena-Leitstudie zeigt, dass das zukünftige sektorübergreifende Energiesystem auf einem breiten Mix an Energieträgern und Technologien basieren sollte. Die Klimaziele lassen sich so mit realistischeren und gesamtwirtschaftlich vorteilhafteren Veränderungspfaden erreichen. Dafür sind Rahmenbedingungen notwendig, die Technologieoffenheit gewährleisten und Innovationen fördern.

Die Investitionszyklen zur Entwicklung neuer Technologien sind je nach Branche sehr unterschiedlich und können bei neuen industriellen Prozess- und Fertigungstechniken zwei bis drei Jahrzehnte umfassen. Die Wirtschaftsakteure brauchen deshalb langfristige Planungssicherheit, um in die Entwicklung und Markteinführung neuer, innovativer Technologien investieren zu können.

Internationalen Kontext berücksichtigen

Der Erfolg der Energiewende in Deutschland ist stark davon abhängig, dass die Energiewende auch international erfolgreich ist. Erstens ist das zukünftige deutsche Energiesystem weiterhin in den europäischen Energiebinnenmarkt integriert und eng mit den internationalen Energiemärkten verbunden. Energieautarkie ist kein Ziel der Energiewende. Deutschland benötigt nicht nur eine hohe inländische Erzeugung erneuerbarer Energien, sondern auch den intensiven Stromaustausch mit dem europäischen Ausland – je nach Szenario und Jahr beträgt der Importsaldo zwischen –62 und +155 TWh/a[1] – sowie Importe klimafreundlicher synthetischer Energieträger aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland in Höhe von 25 bis 744 TWh/a in 2050.[2]

[1] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 213.
[2] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 242.

Zweitens hängt die zeitnahe und kostengünstige Verfügbarkeit von Energiewendetechnologien davon ab, dass internationale Märkte für sie entstehen. Neue Technologien werden nicht nur von deutschen Unternehmen und auch nicht nur für Deutschland als alleinigen Absatzmarkt entwickelt. Um die notwendigen Kostendegressionen zu erreichen, müssen internationale Märkte für Energiewendetechnologien entstehen.

Drittens benötigen Industriebranchen und Produktkategorien, die im internationalen Wettbewerb stehen, verbindliche Handelsvereinbarungen, damit die klimaschutzpolitischen Anforderungen an Unternehmen unterschiedlicher Länder ausgeglichen werden.

Ein breiter Technologiemix führt zu geringeren Mehrkosten

Die in der dena-Leitstudie modellierten Szenarien, die den Zielkorridor von 80 bis 95 Prozent weniger CO_2-Emissionen bis 2050 erreichen, erfordern erhebliche Mehrinvestitionen im Vergleich zu einem Referenzszenario, das die CO_2-Emissionen nur um 62 Prozent reduziert. Diese zur Erreichung der Klimaziele notwendigen Investitionen öffnen vielfältige Chancen für diejenigen Unternehmen, welche die dafür erforderlichen neuen Produkte und Dienstleistungen mit innovativen Technologien und Geschäftsmodellen erfolgreich anbieten. Andere Unternehmen dagegen würden in diesen Szenarien besonderen Herausforderungen gegenüberstehen.

Die geringsten Mehrkosten entstehen in dem Szenario, welches das 80-Prozent-Ziel in einem Energiesystem mit breitem Technologiemix erfüllt; kumuliert bis zum Jahr 2050 belaufen sie sich auf etwa 1,2 Billionen Euro.[3] Am höchsten sind die Mehrkosten mit 2,2 Billionen Euro in dem Szenario, das das 95-Prozent-Ziel in einem Energiesystem mit einem hohen Grad an strombasierten Anwendungen in allen Sektoren erreicht. Ein Energiesystem mit einem Mix unterschiedlicher Energieträger, -infrastrukturen und -anwendungen (einschließlich bereits weitreichenden Einsatzes strombasierter Anwendungen) ist also kostengünstiger als ein System mit einem in allen Verbrauchssektoren besonders hohen Anteil an Elektrifizierung.

In den das Klimaziel erreichenden Szenarien betragen die Kapitalkosten für Investitionen in Energieeffizienz und die Umstellung von Anwendungstechnologien bis 2050 insgesamt 1,1 bis 1,9 Billionen Euro. Hierzu gehören Investitionen in Gebäudesanierungen und Heizungen, neue Fahrzeuge und Verkehrsinfrastrukturen wie Ladesäulen sowie in Kraftwerke, Power-to-X-Anlagen und Erneuerbare-Energien-Anlagen. Hinzu kommen beispielsweise die Kosten für den weiteren, über die heutige Planung hinausgehenden Stromnetzausbau in Höhe von 80 bis 110 Milliarden Euro auf Übertragungsnetzebene sowie 140 bis 250 Milliarden Euro auf Verteilnetzebene.[4] In den 95-Prozent-Szenarien bedingt die Nutzung von klimafreundlichen synthetischen Brenn- und Kraftstoffen weitere Kosten von 450 bis 810 Milliarden Euro. Die kumulierten Mehrkosten reduzieren sich dagegen um 670 bis 790 Milliarden Euro aufgrund eingesparter Mehrkosten für Primärenergie wegen der gesteigerten Energieeffizienz.[5]

Die hier ermittelten Mehrkosten für die 80- und 95-Prozent-Szenarien beziehen sich lediglich auf Energieerzeugung, inklusive Verteilung und Speicherung sowie Importe und Energieverwendung, inklusive der Investitionen in Energieeffizienz und Umstellung von Anwendungstechnologien. Auswirkungen auf Arbeitsplätze oder industriepolitische Effekte wie auch das Entstehen neuer Geschäftsmodelle für den nationalen oder internationalen Markt wurden nicht untersucht. Die Modellierungen der dena-Leitstudie lassen also keine volkswirtschaftlichen Aussagen zu. Ebenso wenig lassen sich einzelwirtschaftliche Bewertungen vornehmen oder Aussagen über die Kostenverteilung auf die Bürgerinnen und Bürger und die Sozialsysteme treffen.

Auch die spezifisch zur Erreichung der Energiewendeziele notwendigen Investitionskosten der Industrie sind nicht quantifiziert. Diese Mehrinvestitionen müssten allen Szenarien entsprechend zugerechnet werden und die Kostendifferenz zwischen den Technologiemix- und den Elektrifizierungsszenarien würde sich tendenziell eher vergrößern.

[3] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 246.
[4] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 219 ff.
[5] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 248.

Investitionsbedarf erstreckt sich über alle Sektoren

Die zuvor geschilderten zusätzlichen Kapitalkosten gegenüber dem Referenzszenario von 1,1 bis 1,9 Billionen Euro für eine erfolgreiche Energiewende bis 2050 veranschaulichen die Dimension des Investitionsbedarfs zur Zielerreichung über die Jahre hinweg. Besonders sichtbar wird dies im Gebäudebereich. Hier beträgt der zusätzliche Investitionsbedarf rund 450 Milliarden Euro in den Technologiemixszenarien und bis zu 1 Billion Euro, wenn auf einen hohen Grad an Elektrifizierung gesetzt wird.[6] Ein entscheidender Faktor ist die jährliche Sanierungsrate. Sie variiert von 1,4 Prozent im Technologiemixszenario bis rund 2 Prozent im Elektrifizierungsszenario. Alle Sektoren zusammengerechnet erreichen die durchschnittlichen jährlichen Mehrinvestitionen 30 Milliarden Euro im günstigsten und bis zu 50 Milliarden Euro im investitionsintensivsten Szenario.

Bürgerinnen und Bürger haben wichtige Rolle als Teilhaber und Investoren

Unabhängig vom gewählten Transformationspfad ist es wichtig, die sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen zu überprüfen. Die Energiewende erfordert hohe Investitionen und bringt tiefgreifende wie sichtbare Veränderungen mit sich, etwa den starken Ausbau der erneuerbaren Energien oder eine veränderte Mobilität. Bürgerinnen und Bürgern sollten deshalb gezielt in die Gestaltung der Energiewende eingebunden werden. Ihre Investitionen im Energie-, Gebäude- und Verkehrsbereich werden mit ausschlaggebend dafür sein, ob die Klimaziele erreichbar sind. Bürgerinnen und Bürger sind nicht nur Adressat der Energiepolitik, sondern wichtige Teilhaber und Investoren der Energiewende.

Unterstützung für die Energiewende sichern

Es besteht in Deutschland ein breiter gesellschaftlicher Konsens über die Notwendigkeit des globalen Klimaschutzes und die Ziele der Energiewende. Trotzdem ist es wichtig, kontinuierlich auf die Bedeutung der Energiewende für die Gesellschaft insgesamt hinzuweisen. Der langfristige individuelle und gesamtgesellschaftliche Nutzen und die damit verbundenen Chancen sind groß. Eine Gesellschaft, die sich dieser Vorteile und Chancen bewusst ist, kann die bevorstehende Transformation entschlossener angehen.

Handlungsempfehlungen

- **Rahmen für CO_2-Vermeidung sichern:** Die Politik sollte ein verlässliches regulatorisches Fundament gestalten, das auf die Vermeidung von CO_2-Emissionen ausgerichtet ist, möglichst auf europäischer oder globaler Ebene.
- **Abgaben- und Umlagensystematik neu gestalten:** Die Bundesregierung sollte noch in dieser Legislaturperiode das System der Abgaben, Entgelte und Umlagen im Sinne einer integrierten Energiewende umgestalten. Ziel muss ein diskriminierungsfreies System („Level Playing Field“) sein, das Verzerrungen zwischen Energieträgern und Sektoren beseitigt und Innovationen ermöglicht. Damit verbunden sollte netz- und systemdienliches Verhalten von Erzeugern und Verbrauchern angereizt werden.
- **Marktversagen verhindern:** Die Bundesregierung sollte in denjenigen Bereichen spezifische Instrumente einführen, wo der übergeordnete regulatorische Rahmen mit Marktorientierung und Technologieoffenheit nicht ausreicht, um die gewünschte Entwicklung anzustoßen. Dies gilt etwa für den Einsatz von Energieeffizienztechnologien sowie bei der rechtzeitigen Erforschung und Markteinführung der langfristig für den Erfolg der Energiewende notwendigen Technologien.
- **Schutz vor Carbon Leakage stärken:** Die deutsche Wirtschaft sollte durch die Energiewende keine Nachteile im globalen Handel haben. Deshalb sollte die Bundesregierung in der geplanten Revision des EU-Beihilferechts ausreichend Handlungsspielräume auf nationaler Ebene sicherstellen.
- **Finanzielle Beteiligung für Bürgerinnen und Bürger ermöglichen:** Die Investitionsdynamik in der Wirtschaft und bei Privathaushalten sollte durch politische Anreize erhöht werden. Die Bundesregierung sollte prüfen, wie Bürgerinnen und Bürgern noch stärker in die Energiewende investieren und von ihr profitieren können.

[6] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 250.

2.2 Wie und wann unterscheiden sich die Transformationspfade untereinander sowie mit Blick auf das 80- und 95-Prozent-Klimaziel?

Die in der dena-Leitstudie modellierten Transformationspfade weisen bereits im Jahr 2030 deutliche Unterschiede auf. Die Pfade unterscheiden sich nicht nur danach, ob ein Szenario auf Technologiemix oder Elektrifizierung setzt. In den Folgejahren ist besonders ausschlaggebend, ob eine CO_2-Reduzierung um 80 oder 95 Prozent angestrebt wird.

Gleichwohl erfordern beide Ziele ein sofortiges Aktivwerden. Deshalb sollte noch in dieser Legislaturperiode entschieden werden, welches Ziel bei der Treibhausgasminderung verfolgt werden soll.

Alle politischen Klimaziele erfordern erhebliche Anstrengungen und ein breites Commitment

Eine Fortschreibung aktueller Entwicklungen auf Basis der bestehenden Rahmenbedingungen und bereits getroffener politischer Entscheidungen ergibt insgesamt nur eine Treibhausgasminderung von 62 Prozent[7] im Jahr 2050. Sowohl das 80-Prozent-Ziel als auch das 95-Prozent-Ziel können grundsätzlich erreicht werden. Dies ist aber nur mit weiter gehenden Maßnahmen in allen Sektoren, einer Forcierung des Engagements aller Beteiligten und passenden politischen Rahmenbedingungen möglich. Dazu sind weitere Untersuchungen nötig.

Derzeit gibt es keinen Konsens darüber, ob 80 oder 95 Prozent Treibhausgasminderung als Klimaziel verbindlich erreicht werden sollen – verschiedene Akteure der Wirtschaft und der Zivilgesellschaft vertreten hier ebenso unterschiedliche Überzeugungen wie Akteure innerhalb der Bundesregierung.

Das Erreichen des oberen Klimazielkorridors ist aus heutiger Sicht mit deutlich mehr Anstrengungen und höheren volkswirtschaftlichen Kosten verbunden als das 80 Prozent-Ziel. Beispielsweise erfordert das 95 Prozent-Ziel, dass die Sektoren Energie, Gebäude und Verkehr durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger und die Hebung von Effizienzpotenzialen vollständig klimaneutral werden. Im Vergleich zum 80-Prozent-Ziel sind ein nochmals höherer Zubau an erneuerbaren Energien, höhere Effizienzbemühungen sowie erheblich höhere Mengen von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen notwendig. Im Industriesektor verbleiben auch unter Berücksichtigung der heute absehbaren technischen Innovationen bei emissionsintensiven Prozessen noch CO_2-Emissionen von insgesamt 16 Mio. t CO_2.[8] Diese Emissionen können aus heutiger Perspektive nur durch den Einsatz von Carbon Capture and Storage (CCS) oder Carbon Capture and Utilization (CCU) vermieden werden. Gleichzeitig erfordert das in Paris festgelegte Klimaziel wohl ein nationales Ziel, dass sich eher am oberen Rand des beschriebenen Korridors bewegt.

Damit zeigen die Studienergebnisse, dass ein Transformationspfad hin zu einem 95-Prozent-Ziel nicht nur eine Verlängerung des Pfads zum 80-Prozent-Ziel ist. Er macht schon heute, ergänzend zu den Maßnahmen zur Erreichung des 80-Prozent-Ziels, ganz andere Herangehensweisen und Technologien erforderlich. Gerade bei Investitionsentscheidungen mit langer Wirksamkeit, beispielsweise bei großen Industrieanlagen mit mehreren Jahrzehnten Nutzungsdauer, ist langfristige Planungssicherheit notwendig. Unternehmen müssen abschätzen können, ob eine Investition in den heutigen Stand der Technik noch zur Erreichung der Klimaziele führt oder ob dadurch zukünftig notwendige Anpassungen zur Erreichung des oberen Bereichs des Zielkorridors erschwert oder verhindert werden (Lock-in).

[7] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 185.
[8] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 189.

In der derzeitigen Klimaschutzdebatte steht vor allem die Frage der Kohleverstromung im Fokus. Die Kohleverstromung nimmt in allen klimazielerreichenden Szenarien der dena-Leitstudie kontinuierlich bis 2050 ab, obwohl ein Kohleausstieg der Modellierung nicht explizit vorgegeben wurde.

Breiter Technologiemix bietet Vorteile

Nicht nur die Entscheidung für ein Klimaziel bis 2050 bringt große Unterschiede, sondern auch die Ausrichtung der Transformationspfade. Je nachdem, ob ein hoher Grad an strombasierten Endenergieanwendungen oder ein breiterer Technologiemix angestrebt wird, ergeben sich in den einzelnen Sektoren zum Teil bereits 2030 sehr unterschiedliche Entwicklungen.

Im Ergebnis zeigt sich, dass Szenarien mit einem breiteren Technologiemix bis 2050 deutlich geringere Kosten verursachen und robuster bei Umsetzungsherausforderungen wie Akzeptanz sind. Weitere volkswirtschaftliche Auswirkungen der Pfade, zum Beispiel Beschäftigungseffekte oder inländische Wertschöpfung, konnten hingegen im Rahmen der dena-Leitstudie nicht betrachtet werden. Ein optimaler Transformationspfad des Energiesystems kann nicht im Detail vorherbestimmt werden. Daher sollten die Rahmenbedingungen so offen gestaltet werden, dass verschiedene Technologien und Energieträger in den Wettbewerb zur effizientesten Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele treten können.

Eines haben alle Szenarien gemeinsam: Die weitgehende beziehungsweise vollständige Abkehr von fossilen Primärenergieträgern ist unverzichtbar. Ein Systemwettbewerb ist erforderlich, um die besten technologischen Innovationen zum Erreichen der energiepolitischen Ziele zu finden.

Zwischenziele sind wichtig, um das Gesamtbudget an Treibhausgasemissionen einzuhalten

Das Paris-Abkommen definiert nicht nur ein Reduktionsziel für Treibhausgasemissionen in 2050 gegenüber 1990, sondern auch eine Gesamtmenge an Treibhausgasemissionen, die bis 2050 ausgestoßen werden darf. Zukünftig notwendige Technologien und Infrastrukturen sollten bereits frühzeitig angestoßen werden. Das ermöglicht den Aufbau von Know-how und die Realisierung von Kostendegressionen und vermeidet „Knicke“ oder „Sprünge“ in den Transformationspfaden, also besonders starke Veränderungen bei Technologien oder Anwendungen innerhalb kurzer Zeit. Darüber hinausgehende Innovationen sollten trotzdem nicht aus den Augen verloren werden.

Nicht nur die Erreichung der Klimaziele in 2050 ist also wichtig, sondern auch die Einsparungen auf dem Weg dorthin. So sehen die Klimaziele der Bundesregierung vor, bis 2030 über alle Sektoren 55 Prozent und bis 2040 insgesamt 70 Prozent der Treibhausgasemissionen einzusparen. Um das Gesamtbudget einzuhalten, ist es notwendig, die Erreichung der Zwischenziele durch ein laufendes Monitoring genau zu kontrollieren.

Zur Erreichung des oberen Korridors der Klimaziele müsste auch ein höheres Zwischenziel für 2040 angesetzt werden, um eine gleichmäßigere Verteilung der notwendigen Emissionsreduktionen über die Jahre zu erreichen und unrealistische Sprünge zu vermeiden. In der dena-Leitstudie wurde deshalb für die Transformationspfade zur Erreichung des 95-Prozent-Ziels ein Zwischenziel von 75 Prozent in 2040 eingeführt.

Handlungsempfehlungen

- **Entscheidung zum Zielkorridor treffen:** Gestützt auf einen intensiven Dialog mit Wirtschaft und Gesellschaft sollte die Bundesregierung noch in dieser Legislaturperiode eine im breiten Konsens getroffene politische Entscheidung dazu herbeiführen, welcher Bereich des (zu breiten) Zielkorridors von 80 bis 95 Prozent Emissionsreduktion angestrebt werden soll. Mit dieser Entscheidung sind große Unterschiede bezüglich der Transformationspfade verbunden.

- **Klimaschutztechnologien erforschen und entwickeln:** Bundes- und Landesregierungen sollten darauf hinwirken, dass Klimaschutztechnologien erforscht, entwickelt und rechtzeitig und in ausreichendem Maße in den Markt eingeführt werden. Innovationszyklen dauern in manchen Branchen zwei bis drei Jahrzehnte. Innovative Technologien sind die Voraussetzung, um ambitionierte Klimaziele zu erreichen. Deutschland schafft damit auch die Grundlage, von der internationalen Umsetzung von Klimaschutz profitieren zu können.

- **Reduzierung der Treibhausgasemissionen kontrollieren:** Die Bundesregierung sollte sektorspezifische Vorgaben und Monitoring nutzen, um die Fortschritte der Treibhausgasminderungen zu evaluieren. Damit kann sie sicherstellen, dass jeder Sektor seiner Verantwortung gerecht wird. Allerdings sollten diese Vorgaben nicht zu starr sein, um Bewegungsspielräume und Optimierungsmöglichkeiten nutzen zu können, beispielsweise durch die Anrechnung von sektorenübergreifender Emissionsvermeidung. Dies betrifft speziell die 2030-Ziele für Einzelsektoren.

2.3
Welche Bedeutung hat die Energieeffizienz für die Erreichbarkeit der Klimaziele?

Eine ambitionierte Energieeffizienzstrategie und eine Senkung des Endenergieverbrauchs in Deutschland sind zwingend erforderlich, um die Energiewendeziele und die wirtschaftspolitischen Ziele für eine reduzierte Abhängigkeit von Importen und Energiepreisen zu erreichen. Für eine integrierte Energiewende gilt es, die Energieeffizienzstrategie so zu gestalten, dass aus einzelwirtschaftlicher Perspektive ausreichend Freiraum besteht, um die Reduzierung von Emissionen und die Optimierung über Systemgrenzen und Wertschöpfungsketten hinweg zu ermöglichen.

Energieeffizienz ist Voraussetzung für Klimaschutz und Wirtschaftswachstum

Energie- und Ressourceneffizienz sowie eine Stärkung der Kreislaufwirtschaft können den Trends zur Erhöhung des Energieverbrauchs durch Wirtschaftswachstum und Konsumsteigerung entgegenwirken. In den Untersuchungen der dena-Leitstudie wird von einem gesamtwirtschaftlichen Wachstum von 1,0 Prozent pro Jahr ausgegangen. Dies würde je nach Szenario in einen Energieverbrauch für den Industriesektor von 1.000 bis 1.100 TWh/a im Jahr 2050 münden. Dem stehen angenommene Energieeffizienzsteigerungen im Industriesektor von je nach Szenario 0,85 bis 1,12 Prozent jährlich gegenüber. Sie können den Energieverbrauch auf 670 bis 840 TWh/a in 2050 begrenzen. Das entspricht einer Absenkung um 26 bis 33 Prozent.

Im Gebäudesektor sinkt der Energieverbrauch um 47 bis 64 Prozent. Auch die Energienachfrage im Verkehrssektor kann trotz steigender Verkehrsnachfrage um 43 bis 52 Prozent reduziert werden. Das liegt zum einen an der starken Elektrifizierung, zum anderen an der gestiegenen Energieeffizienz der Fahrzeuge.

Nur mit ausreichender Steigerung der Energieeffizienz kann die Energiewende im Gesamtsystem möglichst kosteneffizient umgesetzt werden. Die Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland sind besser erreichbar, wenn der absolute Energieverbrauch reduziert wird. Energieerzeugungskapazitäten und Energieimporte können reduziert werden. Auch die Versorgungssicherheit steigt. „Energieeffizienz made in Germany“ ist schließlich ein weltweiter Zukunftsmarkt für die Industrie und bietet Vorteile für Wettbewerbsfähigkeit sowie Innovationskraft der deutschen Wirtschaft.

Bisher werden die Energieeffizienzziele nicht erreicht

Die bisherigen Energieeffizienzsteigerungen bleiben deutlich hinter den Zielwerten zurück. Im Energiekonzept der Bundesregierung ist eine Steigerung von 2 Prozent pro Jahr angesetzt. Tatsächlich liegt sie nur bei etwa 1 Prozent. Es droht eine Fortsetzung dieses Trends und damit eine Vergrößerung der Effizienzlücke. Ohne Umsteuern sind auch die anderen Ziele der Energiewende nicht zu erreichen. Dabei gilt: Je später das Umsteuern erfolgt, desto aufwendiger ist die Umsetzung.

Die technischen Potenziale für Energieeffizienz durch technischen Fortschritt und Digitalisierung liegen oft deutlich über 50 Prozent des Energieverbrauchs. Allein die bereits heute hochrentablen Energieeffizienzpotenziale würden den Energieverbrauch in Deutschland um 10 bis 20 Prozent senken.

Energieeffizienz muss stärker systemisch bewertet werden

Energieeffizienz muss stärker systemisch betrachtet werden. So mag eine direktelektrische beziehungsweise strombasierte Anwendung für sich betrachtet effizienter sein. Sie könnte aber eventuell höhere Hürden verursachen, weil nationale Flächenpotenziale stärker ausgereizt oder mehr Speicher- oder Reservekapazitäten für die jederzeitige Bereitstellung der benötigten Strommengen aufgebaut werden müssen. Eine verstärkt systemische Betrachtung kann die notwendige Balance zwischen Energieeffizienz auf der einen Seite und Aspekten wie Flexibilität oder Ressourceneffizienz auf der anderen Seite schaffen. Dies muss sich in den politischen Instrumenten ebenso widerspiegeln wie in der Praxis, etwa in der Ausbildung von Energieberatern. Auch Rebound-Effekte sollten stärker in den Fokus rücken. Sonst kann es schnell dazu kommen, dass gewünschte Einsparungen trotz Energieeffizienzmaßnahmen nicht erreicht werden.

Handlungsempfehlungen

- **Energieeffizienzstrategie kontrollieren und justieren:** Im Rahmen des geplanten Prozesses „Weißbuch Energieeffizienz“ sollte die Bundesregierung die bestehende Energieeffizienzstrategie und alle Einzelinstrumente überprüfen. Wichtig sind Aspekte wie Zielerreichung, Wirksamkeit (Effektivität), Kosten-Nutzen-Verhältnis (Effizienz) sowie die Beförderung von Markt und Know-how. Die Entwicklung der Energieeffizienz sollte kontinuierlich beobachtet (Monitoring) und wenn nötig sollte mit stärkeren Instrumenten nachgesteuert werden. Entscheidend sind folgende Punkte:
    - Die Energieeffizienzpolitik sollte zur Unterstützung und Förderung einer systemischen Optimierung über Sektoren, Energieträger und Wertschöpfungsketten hinweg weiterentwickelt werden.
    - Das System von Steuern, Abgaben und Umlagen sollte neu gestaltet werden, damit sich mehr Effizienzmaßnahmen wirtschaftlich lohnen.
    - Die Instrumente sollten die gesamte Handlungskette von der Erstinformation und Motivation über die Beratung und Maßnahmenentwicklung bis zur Finanzierung, Umsetzungsbegleitung und Evaluierung beziehungsweise Nachsteuerung umfassen.
    - Die individuellen Entscheidungs- und Handlungsfreiheiten sollten mit einem ausgewogenen Mix zwischen Ordnungsrecht und Anreizpolitik bestehen bleiben. Beispielsweise sind Mindestanforderungen für Anbieter und die Stärkung von Transparenz und Anreizen gegenüber einer Umsetzungspflicht für alle Endverbraucher zu bevorzugen.
    - Die Möglichkeiten der Digitalisierung und innovativer Lösungen zur Erschließung von Energieeffizienzpotenzialen sollten stärker systematisch genutzt werden.
    - Es müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die marktwirtschaftliche Investitionsentscheidungen in Richtung Energieeffizienz lenken.
- **Forschung für Energieeffizienz verstärken:** Die Bundesregierung sollte bei der weiteren Gestaltung des Energieforschungsprogramms die Erforschung und Demonstration von Hocheffizienztechnologien gerade für Systemschnittstellen aufnehmen.
- **Aus- und Weiterbildung verbessern:** Die Bildungsministerien der Länder und des Bundes sollten eine Strategie entwickeln, um die Erfordernisse einer weiter gehenden systemischen Perspektive und integrierten Energiewende bei der Aus- und Weiterbildung zu verankern.
- **Informationsangebote für Anwender schaffen:** Ein attraktives und leicht zugängliches zentrales Informationsangebot und eine breite Kommunikation sollen alle Energieanwender motivieren und in die Lage versetzen, mehr in Energieeffizienz zu investieren. Diese Informations- und Kommunikationsangebote sollten von allen wesentlichen Fachakteuren und Multiplikatoren mitgetragen und unterstützt werden.
- **Ambitionierte EU-Standards unterstützen und schneller umsetzen:** Viele Regelungen für Energieeffizienz werden auf EU-Ebene gestaltet und entschieden, zum Beispiel Energieeffizienz-Mindeststandards für immer mehr Produkte (EU-Ökodesign). Die Bundesrepublik sollte die Europäische Union bei der Entwicklung ambitionierter Standards unterstützen und die nationale Umsetzung der Standards beschleunigen.

2.4 Was kann und muss der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland leisten?

Erneuerbare Energien sind neben der Energieeffizienz der zweite entscheidende Baustein zum Erreichen der Klimaziele. Neben der direkten Nutzung von erneuerbaren Energien im Bereich der Wärme, beispielsweise mittels Solarthermie, muss hierfür bis 2050 insbesondere die Stromerzeugung in allen Szenarien weitestgehend mit erneuerbaren Energien erfolgen. Der Strombedarf steigt trotz Effizienzbemühungen in allen Bereichen, weil unterschiedliche Prozesse zunehmend elektrifiziert werden, zum Beispiel in der Industrie oder beim Ausbau von Elektromobilität und Stromwärmepumpen.

Onshore-Wind und Photovoltaik müssen stärker als geplant ausgebaut werden

Die dena-Leitstudie geht davon aus, dass Wasserkraft und die energetische Nutzung von Biomasse keine relevanten Ausbaupotenziale in Deutschland haben. Bei der Biomasse ist die Nutzungskonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion in der gesellschaftlichen Diskussion aktuell ein wichtiger Faktor. Auch die Importmöglichkeiten sind begrenzt.[9] Gleichzeitig zeigt die Debatte mit den Stakeholdern, dass Biogas in Zukunft effizienter genutzt werden kann. Statt der heutigen Vor-Ort-Verstromung sollte in Zukunft vorrangig die Einspeisung von Biogas in das Gasnetz angereizt werden. Auf diese Weise lässt sich Biogas saisonal und räumlich flexibel in allen Sektoren nutzen.

Der größte Zubau bei erneuerbaren Energien muss aus den im Vergleich zu anderen Optionen kostengünstigen Windenergieanlagen an Land (Onshore-Wind) sowie der Photovoltaik erfolgen. Bei Onshore-Wind rechnet die dena-Leitstudie mit einem durchschnittlichen Nettozubau von 3,7 bis 4,0 GW pro Jahr in der Zeit von 2015 bis 2050, bei Photovoltaik mit 2,2 bis 3,6 GW. Das entspricht bei den 80-Prozent-Szenarien einer Verdreifachung, bei den 95-Prozent-Szenarien einer Vervierfachung der heute installierten Erzeugungsleistung für erneuerbaren Strom.[10] Der in den Szenarien errechnete Ausbau von Onshore-Wind übersteigt den aktuell gesetzlich angestrebten jährlichen Bruttoausbau von 2,5 GW/a. Die Technologie wird in den meisten Szenarien bis 2050 bis an ihre Potenzialgrenze ausgebaut. Wichtig ist, zwischen Brutto- und Nettozubau zu unterscheiden. Nettozubau berücksichtigt bloße Ersatzinvestitionen nicht; er ist daher deutlich ambitionierter als der gesetzlich vorgegebene Bruttozubau.

Ausbauhemmnisse bei Onshore-Wind erhöhen mittelfristig die Bedeutung von Offshore-Wind

Bei Windenergieanlagen auf See (Offshore-Wind) ergibt die Modellierung im Rahmen der dena-Leitstudie bis 2030 aus Kostengründen lediglich einen Ausbau auf 15 GW nach den aktuellen politischen Zielvorgaben. Der Vergleich der verschiedenen Szenarien und Sensitivitäten zeigt, dass in den Jahren nach 2030

[9] Mögliche Einspeisungen von Biomethan ins Erdgasnetz werden bereits in der Modellierung berücksichtigt. Andere Untersuchungen – unter anderem dena-Studien – gehen von einem weiteren Potenzial von Biomasse in Deutschland aus. Es ist anzunehmen, dass Biomasse bei höheren Potenzialen dann entsprechend bis zu ihrer Potenzialgrenze ausgeschöpft wird.

[10] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 202.

ein Ausbau über das politische Ziel von 15 GW hinausgehen sollte, wenn weniger Importmöglichkeiten von Strom und synthetischen Kraft- und Brennstoffen aus dem Ausland vorhanden[11] sind oder/und Onshore-Wind in Deutschland nicht so stark ausgebaut werden kann wie nötig. Dies könnte eintreten, wenn der Onshore-Ausbau nicht die nötige Akzeptanz findet oder weniger Windvorrangflächen verfügbar sind.[12] In der dena-Leitstudie ergibt sich je nach Szenario für 2050 für Offshore-Wind eine installierte Leistung von bis zu 34 GW.[13] Eine stärkere Kostendegression von Offshore-Wind wird möglicherweise ebenfalls zu einer höheren Wettbewerbsfähigkeit und einem stärkeren Zubau von Offshore-Wind führen.

Der Ausbau von Erneuerbaren benötigt Akzeptanz, Flächen und Stromnetze …

Der erforderliche hohe Nettozubau der erneuerbaren Energien liegt auf dem durchschnittlichen Niveau der letzten fünf Jahre und erscheint daher grundsätzlich umsetzbar. Die Realisierung ist jedoch eine Herausforderung. Widerstände nehmen bei neuen Windparkprojekten zu und einzelne Bundesländer haben die verfügbaren Windflächen deutlich reduziert. Die teils bestehenden Regelungen, nach denen der Abstand einer Windkraftanlage von Wohngebäuden mindestens zehnmal so groß sein muss, wie die Anlage hoch ist, wurden in der dena-Leitstudie nicht berücksichtigt. Solche Regelungen begrenzen das verfügbare Flächenpotenzial für Windenergie zusätzlich.

Der notwendige kontinuierlich starke Ausbau erneuerbarer Energien setzt voraus, dass der Stromnetzausbau erheblich beschleunigt wird und die Stromnetzkapazitäten optimal ausgelastet werden. Zudem muss eine stärker integrierte Optimierung der verschiedenen Energieinfrastrukturen und -märkte aus Gesamtsystemperspektive erfolgen.

… aber auch Rahmenbedingungen für eine intelligente Systemintegration

Besonders auf regionaler Ebene und im urbanen Raum bestehen Potenziale zur energetischen Optimierung der verschiedenen Energieinfrastrukturen für Strom, Gas und Wärme und zur verbrauchsnahen Erzeugung beispielsweise durch Aufdach-Photovoltaik. Die Nutzung von dezentralen Flexibilitäten wie Demand Side Management (DSM) oder eine intelligente Kombination mit Speichern und gesteuerten Lademöglichkeiten für Elektroautos können positiv auf die Systemstabilität und -effizienz wirken. Es bestehen hier auch eine hohe Innovationskraft und Investitionsbereitschaft durch lokale Wertschöpfungsnetzwerke sowie die Möglichkeiten zur aktiven Mitgestaltung durch die Bürger. Bei richtiger Ausgestaltung ist eine Partizipation weiterer Bevölkerungsschichten möglich, beispielsweise durch Mieterstrom oder Quartiersmodelle. Das Marktdesign und die Netzregulierung müssen so ausgelegt werden, dass diese lokalen Potenziale in Verbindung mit den volkswirtschaftlichen Möglichkeiten durch die großräumigen Energiemärkte in Deutschland und Europa bestmöglich genutzt werden können.

Handlungsempfehlungen

- **Ausbaukorridore erweitern:** Die Bundesregierung sollte im Zuge der nächsten EEG-Novelle die gesetzlichen Ausbaukorridore für Onshore-Wind und Photovoltaik so anpassen, dass die Ziele für 2030 und 2050 erreicht werden können. Je nachdem, ob bei der CO_2-Reduktion bis 2050 ein 80- oder 95-Prozent-Ziel gewählt wird, fallen die Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien unterschiedlich aus.
- **Räumliche Koordination verbessern:** Ergänzend zu den Maßnahmen zur Optimierung von Stromnetzausbau und Netzauslastung – mit Prüfung der Vorteile einer stärker integrierten Betrachtung zwischen Strom- und Gasnetzinfrastruktur – sollte die Bundesregierung Instrumente prüfen, die eine bessere räumliche Allokation und eine Koordination des Ausbaus der erneuerbaren Energien mit dem Stromnetzausbau ermöglichen.
- **Ausreichende Flächen in den Ländern bereitstellen:** Die Landesregierungen und die Bundesregierung sollten gemeinsam sicherstellen, dass für den mittel- und langfristig erforderlichen und gesetzlich festgelegten Ausbaupfad für erneuerbare Energien auch in Summe über alle Bundesländer ausreichend Flächenpotenziale vorhanden sind. Dabei sollten sie die Abstandsregelungen und ausgewiesenen Vorrangflächen berücksichtigen.
- **Ausbau von Offshore-Wind vorbereiten:** Die Bundesregierung sollte mit einem Vorlauf von mindestens zehn Jahren die weiter gehende Strategie zum Ausbau von Offshore-Wind ab 2030 gestalten und beschließen.

[11] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 281.
[12] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 280 f.
[13] Im Falle der Sensitivitätsbetrachtung bei geringeren verfügbaren Offshore-Wind-Potenzialen auch bis zu 80 GW; vgl. ewi-Gutachterbericht (2018), S. 281.

2.5 Welche Bedeutung haben erneuerbare synthetische Energieträger und Grundstoffe?

Energieeffizienz, erneuerbare Energien und Elektrifizierung leisten in allen untersuchten Szenarien einen entscheidenden Beitrag zur Energiewende. Ein weiterer maßgeblicher Treiber für die Erreichung ambitionierter Klimaziele sind klimafreundlich erzeugte synthetische Kraft- und Brennstoffe (sogenannte Green PowerFuels).

Synthetische Energieträger und Grundstoffe schließen Lücke für erfolgreiche Energiewende

Synthetische Energieträger (PowerFuels) werden erzeugt, indem zum Beispiel Wasser im Elektrolyseverfahren mithilfe von erneuerbarem Strom in Wasserstoff und Sauerstoff aufgeteilt wird. Der gasförmige Wasserstoff kann in weiteren Syntheseschritten zum gasförmigen Energieträger Methan oder zu flüssigen Kraft- und Brennstoffen wie Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas, LNG) sowie synthetischem Benzin, Diesel und Kerosin verarbeitet werden.

Neben der Verwendung als Energieträger werden die synthetisierten Stoffe auch als nichtfossile Ausgangsstoffe für die chemische Industrie erforderlich sein.

Ein optimaler Transformationspfad des Energiesystems für die nächsten 30 Jahre lässt sich nicht sicher vorherbestimmen, da zu viele Unsicherheitsfaktoren auf dem Weg bestehen. Aber unabhängig davon, ob man auf eine stärkere Elektrifizierung oder auf einen breiteren Technologiemix setzt, zeigen die Ergebnisse der dena-Leitstudie, dass synthetische Energieträger für die Erreichung der Klimaziele eine wichtige Rolle spielen. Der Bedarf im Jahr 2050 kann bis zu 908 TWh betragen.[14] PowerFuels können erneuerbaren Strom unter Nutzung der entsprechenden Infrastrukturen saisonal speichern. Das macht erneuerbare Energien im internationalen Handel weiträumig verfügbar. PowerFuels werden insbesondere dort eingesetzt werden, wo strombasierte Anwendungen nicht möglich oder nicht wirtschaftlich sind. Die hierfür benötigten Technologien sind weitgehend vorhanden, bedürfen aber eines zügigen Markthochlaufs, damit Praxiserfahrungen in den realen Netzen, weitere Innovationen und Skaleneffekte erzielt werden können.

Bei Sensitivitätsrechnungen, die deutlichere Herausforderungen und Akzeptanzprobleme bei der Umsetzung der Energiewende untersuchen, werden synthetische Energieträger umfassender und früher benötigt, auch wenn bis 2050 nur der untere Rand des klimapolitischen Zielkorridors einer 80-prozentigen Treibhausgasminderung erreicht werden soll.

[14] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 239.

Synthetische Energieträger werden international erzeugt und gehandelt

Das Gros der Nachfrage nach synthetischen Energieträgern in 2050 in Deutschland wird nach heutiger Einschätzung aus Regionen wie Nordafrika importiert, da dort die Produktionskosten inklusive Transport günstiger sind und im Vergleich zu Deutschland größere Flächenpotenziale bestehen.

Selbst bei starkem Einsatz sind die Importmengen synthetischer Energieträger in 2050 insgesamt deutlich geringer als die heutigen Importmengen an fossilen Brennstoffen. Eine vollständige Energieautarkie in Deutschland oder Europa sollte aber aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit nicht angestrebt werden.

National werden in 2050 zwischen 130 und 164 TWh/a[15] an synthetischen Brennstoffen unter optimierter Nutzung von Einspeisespitzen erneuerbarer Energien erzeugt. Mit Blick auf die dafür im Gutachten für 2030 angenommenen Elektrolysekapazitäten von 15 GW in Deutschland – insbesondere zur Erzeugung von Wasserstoff für neue, klimafreundliche Anwendungen im Industrie- und Verkehrssektor – muss zeitnah ein entsprechender Ausbau beginnen. Wegen der zu erwartenden Kostendegression bei den verwendeten Technologien sollte der Markthochlauf dabei nicht linear, sondern wie bei anderen technologischen Innovationen exponentiell ansteigend erfolgen.

Synthetische Energieträger kommen in allen Sektoren und Anwendungen zum Einsatz

Für eine deutliche Treibhausgasminderung sind in allen Sektoren synthetische Energieträger notwendig. Vor allem zur Erreichung des 95-Prozent-Ziels nimmt die Bedeutung von PowerFuels in allen Szenarien deutlich zu. Der starke Einsatz von synthetischen Energieträgern setzt ehrgeizige internationale Klimaschutzbemühungen voraus, damit eine breite internationale Durchdringung der Technologien erfolgt und die benötigten Energieträgerimporte nach Deutschland in 2050 realistisch sind.

Die zur Produktion von PowerFuels benötigten Technologien bestehen zwar grundsätzlich schon seit vielen Jahrzehnten. Die aktuell vorhandenen beziehungsweise geplanten Produktionsanlagen zur Erzeugung synthetischer Energieträger aus Strom sind mit bis zu 10 MW noch als eher klein zu betrachten. Mit der Skalierung bei Anlagengröße und Anzahl der Installationen sind daher weitere technische Innovationen und Kostendegressionen zu erwarten.

Da der Einsatz synthetischer Energieträger einen bedeutenden Einfluss auf die Ausgestaltung des Energiesystems hat, wurde in Sensitivitätsrechnungen die Auswirkung veränderter Annahmen bezüglich der Kostendegression bei den erforderlichen Elektrolyse- und Syntheseverfahren untersucht.[16] Im Ergebnis bleiben die technologieoffenen Szenarien auch bei Annahme deutlich geringerer Kostensenkungen für die darin erforderlichen Technologien vorteilhafter als Szenarien mit hohem Anteil an strombasierten Endenergieanwendungen und den dafür notwendigen Anpassungen und Investitionen in den Verbrauchssektoren.[17]

Die Sensitivitätsuntersuchung zeigt auch: Wenn die Importmöglichkeiten aus dem außereuropäischen Ausland nicht im angenommenen Maße verfügbar sind, könnten die benötigten PowerFuels auch aus dem europäischen Ausland bezogen werden. Hier wäre allerdings weiter gehend zu untersuchen, welche Potenziale sich ergäben, wenn das EU-Ausland ähnliche Klimaschutzbemühungen wie Deutschland unternimmt.

Flüssige und gasförmige synthetische Energieträger sind relevant

In welchem Verhältnis die verschiedenen synthetischen Energieträger (Wasserstoff, Methan oder flüssige Kraftstoffe) perspektivisch in den verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen, kann auf Basis der Untersuchungsergebnisse nicht abschließend beurteilt werden. Ihr Verhältnis zueinander reagiert sehr sensitiv auf Änderungen bei vielen heute noch nicht absehbaren Unbekannten (zum Beispiel sektorspezifische CO_2-Regulierung, Zahlungsbereitschaft, Konsumentenpräferenzen).

Entscheidend in den Ergebnissen der dena-Leitstudie ist vielmehr, dass synthetische Energieträger mit Fortschreiten der Energiewende immer wettbewerbsfähiger im Vergleich zu den konventionellen, fossilen Alternativen werden (Erdöl und Erdgas sowie Wasserstoff aus Erdgasdampfreformierung). Die Frage, welche Lösungen sich tatsächlich für welche Anwendungsbereiche durchsetzen, wird letztlich der Markt beantworten.

[15] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 242.
[16] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 242.
[17] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 292; Die kumulierten Gesamtkosten steigen in der Sensitivität Power-to-X bei EL95 um 194 Milliarden Euro und bei TM95 um 460 Milliarden Euro. Dennoch bleibt das TM95-Szenario in der Sensitivität trotz der höheren Power-to-X-Kosten insgesamt günstiger als das EL95-Szenario.

Handlungsempfehlungen

- **Internationale Märkte aufbauen:** Die Bundesregierung sollte konsequent für die Entwicklung globaler Märkte für synthetische Brenn- und Kraftstoffe werben, diese mit anstoßen und unterstützen (zum Beispiel im Rahmen der Energiepartnerschaften und auf G20-Ebene) sowie die Technologieführerschaft anstreben.

- **Markthochlaufstrategie für synthetische Energieträger entwickeln:** Die Bundesregierung sollte in dieser Legislaturperiode eine aktive Strategie für einen beginnenden Markthochlauf von synthetischen Energieträgern in Deutschland entwickeln und unter anderem durch folgende Maßnahmen unterstützen:

  - Bei der Einführung von neuen Wasserstoffanwendungen sollte von Anfang an insbesondere CO_2-frei erzeugter Wasserstoff eingesetzt werden, um einen Entwicklungsmarkt für die Skalierung von Power-to-Gas/Power-to-Liquid-Technologien zu schaffen. Die Bundesregierung sollte dafür auf europäischer Ebene auf eine angemessene Anrechenbarkeit der Nutzung von klimafreundlichen synthetischen Energieträgern auch in Vorprozessen auf anwendungssektorspezifische Quoten und Ziele hinwirken. Dies betrifft beispielsweise die Treibhausgas-Minderungsquote beziehungsweise die Flottenemissionsziele der Fahrzeughersteller. Dadurch kann beispielsweise für derzeitige Wasserstoffanwendungen in Raffinerien ein Anreiz zum Einsatz von grünem Wasserstoff entstehen.

  - Bei der weiteren Ausgestaltung des Energieforschungsprogramms sollte ein Schwerpunkt auf der Kostendegression der für synthetische Energieträger erforderlichen Technologien liegen.

  - Die Bundesregierung sollte die Einführung von zeitlich begrenzten Instrumenten zur Markteinführung von Power-to-Gas/Power-to-Liquid-Anlagen prüfen.

  - Die Bundesregierung sollte kurzfristig die bestehenden Regelungen für zuschaltbare Lasten im Hinblick auf eine stärkere Technologieoffenheit überarbeiten, um Möglichkeiten zur Nutzung anderweitig nicht integrierbarer erneuerbarer Strommengen auch für die Verwendung in Power-to-Gas/Power-to-Liquid-Anlagen zu schaffen.

- **Infrastrukturen für gasförmige und flüssige Energieträger weiterentwickeln:** Flankierend sollte die Bundesregierung die Weiterentwicklung der Infrastrukturen für gasförmige und flüssige Kraft- und Brennstoffe planen.

  - Die Bundesregierung und die Gasnetzbetreiber sollten gemeinsam daran arbeiten, die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas voranzutreiben und mittelfristig die technischen Voraussetzungen für steigende Wasserstoffanteile im Gasnetz schaffen. Hierbei sind die Ergebnisse der im Koalitionsvertrag angedachten integrierten Infrastrukturplanung zu berücksichtigen.

  - Die Bundesregierung und die Betreiber der Infrastrukturen für flüssige Energieträger sollten gemeinsam eine Roadmap für den Einsatz von flüssigen synthetischen Kraft- und Brennstoffen in Deutschland entwickeln.

2.6 Wie lassen sich Versorgungssicherheit und Deckung der Nachfrage auch bei Dunkelflaute gewährleisten?

Durch Wirtschaftswachstum und stetige Elektrifizierung steigen trotz Energieeffizienz die Stromnachfrage und die Jahreshöchstlast deutlich,[18] je nach Szenario auf bis zu 840 TWh/a bei einer Jahreshöchstlast von 100 GW im Technologiemixszenario und auf bis zu 1.160 TWh/a bei Höchstlast von 160 GW im Elektrifizierungsszenario.[19]

Energiesystem 2050 muss weiter steigende Stromnachfrage und Jahreshöchstlast sicher abdecken

Die Stromnachfrage zu jedem Zeitpunkt direkt durch erneuerbare Energien abzudecken, wird auch zukünftig nicht möglich sein, weil diese weitgehend witterungsabhängig sind und Strom nur entsprechend dem Dargebot bereitstellen können.

Entscheidenden Einfluss auf den Bedarf an gesicherter steuerbarer Erzeugungsleistung haben unter anderem

- die Preiselastizität beziehungsweise Steuerbarkeit der Nachfrageseite (Demand Side Management) einschließlich dezentraler Speicher,
- die Gleichzeitigkeit der residualen Spitzenlast und der mögliche Beitrag aus dem Ausland,
- die Wahrscheinlichkeit von abzudeckenden Wetterereignissen („kalte Dunkelflaute“ über längere Zeit),
- die Notwendigkeit zur Abdeckung besonderer Wetterereignisse beziehungsweise die Akzeptanz von Einschränkungen oder Priorisierungen der Versorgung während seltener Extremwetterereignisse,
- der Grad der Elektrifizierung über alle Sektoren hinweg, beispielsweise von Prozessen in der Industrie, sowie der verstärkte Einsatz von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen.

Der Bedarf an gesicherter Leistung muss mit Blick auf die oben genannten Einflussfaktoren und verschiedene Methoden der Bewertung von Versorgungssicherheit weiter untersucht und erörtert werden.

[18] Zum Vergleich: Die Stromnachfrage 2015 betrug 567 TWh, die Jahreshöchstlast 84 GW; vgl. ewi-Gutachterbericht (2018), S. 197 und 207.
[19] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 197 und 207.

Die erneuerbare Stromproduktion wird auch im europäischen Ausland aufgrund der europäischen Klimaziele ansteigen, ebenso die Stromnachfrage aufgrund der weiter zunehmenden Elektrifizierung. Die Gleichzeitigkeit der erneuerbaren Erzeugung in Europa bleibt aber vergleichsweise hoch. Wenn in Deutschland wenig erneuerbarer Strom zur Verfügung steht, trifft dies zu einer hohen Wahrscheinlichkeit auch auf die benachbarten Länder zu.

Speicher, Demand Side Management und Gaskraftwerke stellen gesicherte Leistung bereit

Die Jahreshöchstlast wird heute wie in 2050 insbesondere durch gesicherte steuerbare Kraftwerksleistung, Demand Side Management, Speicher und Stromimporte gedeckt. Als gesicherte Kraftwerksleistung kommen vor allem Gaskraftwerke und größere sowie kleinere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zum Einsatz, die zunehmend durch synthetische Brennstoffe betrieben werden. Der steigende Bedarf an gesicherter Leistung durch den zunehmenden Einsatz strombasierter Anwendungen macht zusammen mit dem Ausstieg aus der Kernkraft und der Reduzierung von Kohlekraftwerken bereits zwischen 2020 und 2030 einen deutlichen Neubau von Gaskraftwerken notwendig, der bis 2050 weiter ansteigt. Dabei sind die Kraftwerke durch den wachsenden Anteil erneuerbarer Energien am Strommarkt nur für vergleichsweise wenige Stunden im Jahr in Betrieb.

Die zur Bereitstellung der gesicherten Leistung notwendigen Investitionen sowie die Betriebs- und Wartungskosten im Energiesektor unterscheiden sich mit 140 bis 170 Milliarden Euro in den Technologiemixszenarien gegenüber 310 bis 320 Milliarden Euro in den Elektrifizierungsszenarien erheblich.[20] Diese Kosten sind in den in dieser Studie ausgewiesenen Mehrkosten enthalten.

Der Energy-Only-Markt vergütet nur Strommengen, nicht die Bereitstellung von Kraftwerksleistung. Bei freier Preisbildung kann es zu hohen Knappheitspreisen kommen. Häufigkeit und Höhe sind aber schwer vorherzusehen oder in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einzuplanen. Es sollte genau beobachtet werden, ob der Energy-Only-Markt ausreichende Anreize für Investitionen in gesicherte Leistung und zur Aktivierung von Nachfrageflexibilität setzen kann. Dies gilt für die zu erwartende Knappheit am Strommarkt durch den Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 und die Reduzierung der Kohlekraftwerke. Langfristig stellt sich diese Frage durch die steigende Stromnachfrage und weiter sinkende Volllaststunden von Kraftwerken umso mehr.

Handlungsempfehlungen

- **Stakeholderprozess zur Versorgungssicherheit einrichten:** Die Bundesregierung sollte ergänzend zu der geplanten Kommission zu den Fragen des Kohleausstiegs und Strukturwandels einen Stakeholderprozess zu den Fragestellungen der Entwicklung der Versorgungssicherheit ins Leben rufen. Der Fokus sollte auf der Untersuchung des Bedarfs an gesicherter Leistung für Strom in Deutschland und den Möglichkeiten zu dessen Deckung sowie der ausreichenden Versorgungssicherheit bei Wärme liegen. Ziel ist, mit Blick auf neue Fragestellungen der integrierten Energiewende zu einem besseren gemeinsamen Verständnis im Kreis von Fachexperten und politischen Akteuren zu kommen (Preiselastizität der Nachfrageseite, Beitrag gesicherter steuerbarer Leistung durch Demand Side Management, Speicher oder Elektrofahrzeuge sowie die Korrelationen mit den Entwicklungen im europäischen Ausland und Umgang mit extremen Wetterereignissen).
- **Monitoringsysteme weiterentwickeln:** Darauf aufbauend sollte die Bundesregierung das in Deutschland verwendete Abschätzungsverfahren der Leistungsbilanz[21] und das Monitoringsystem des Versorgungssicherheitsberichts weiterentwickeln. Darüber hinaus sollte sie ein enges Monitoring von Knappheitspreisen und -situationen am Strommarkt als auch der Entwicklung des Kraftwerkparks sowie des Angebots an Speichern und Nachfrageflexibilität aufsetzen.
- **Reservemechanismen überprüfen:** Die Bundesregierung sollte mittelfristig untersuchen, inwiefern sich Weiterentwicklungsbedarf für das derzeitige Instrumentenset der Reservemechanismen ergibt.

[20] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 249 ff.
[21] Die deutschen Übertragungsnetzbetreiber nutzen bereits heute zum Beispiel im Rahmen des Pentalateralen Energy Forums (PLEF) sogenannte probabilistische Verfahren (siehe „Diskurs: Versorgungssicherheit und Dunkelflaute“).

Diskurs: Versorgungssicherheit und Dunkelflaute

Die Gewährleistung von **Versorgungssicherheit ist eine der zentralen Anforderungen** an das Energiesystem. In der Entwicklung des Energiesystems bis 2050 ist ein zunehmend steigender Anteil fluktuierender Erzeugung aus erneuerbaren Stromquellen zu erwarten. Gleichzeitig wächst der Bedarf an elektrischer Leistung durch die zunehmende Elektrifizierung von Gebäudesektor, Verkehrssektor und Industrie. Unter dem Begriff „lange, kalte Dunkelflaute“ wird eine längere Zeit mit geringer Stromerzeugung fluktuierender erneuerbarer Energien durch Photovoltaik- und Windkraftanlagen bei gleichzeitig erhöhtem Strombedarf für elektrische Beheizungstechnologien aufgrund niedriger Außentemperaturen verstanden. Dann muss über einen längeren Zeitraum eine relativ hohe Last weitgehend durch gesicherte Kraftwerkskapazitäten und durch Stromimporte gedeckt werden.

Nach Veröffentlichung des Zwischenfazits der dena-Leitstudie im Oktober 2017 und in der anschließenden Diskussion im Partnerkreis wie mit relevanten Akteuren aus Wissenschaft und Politik zeigte sich rasch, dass die Ergebnisse und Erkenntnisse, aber auch die Erwartungen und Modellparametrisierungen zum Thema **„Dunkelflaute“ sehr kontrovers diskutiert** werden. Die zentralen Fragen sind, ist, welche Auswirkungen die Energiewende auf die Entwicklung der Versorgungssicherheit – insbesondere in Bezug auf die Jahreshöchstlast und ihre Deckung – haben wird und ob es überhaupt zusätzlich erforderlich ist, sich auf eine sogenannte Dunkelflaute einzustellen.

Aus den geführten Diskussionen hat sich sehr deutlich die Notwendigkeit ergeben, die Anforderungen an das Energiesystem der Zukunft zum Erhalt der Versorgungssicherheit **gesamtgesellschaftlich zu diskutieren und politisch festzulegen.**

Dabei sind vier Fragen relevant:

1. Wie hoch sind die **nachgefragte Strommenge und Spitzenlast** während einer kalten Phase? Wie groß ist die Gleichzeitigkeit der Elektroanwendungen und gibt es Verschiebepotenziale?

2. Wie niedrig ist der mindestens zu erwartende **Beitrag von erneuerbarer Stromerzeugung** während einer „Dunkelflaute“ und wie lange hält dieser Zeitraum mit schwacher Erzeugung aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen an?

3. In welchem Umfang kann und will sich Deutschland **auf das europäische Ausland** verlassen, hinsichtlich:

   - Annahmen zu stochastischen Ausgleichseffekten für die Gleichzeitigkeit hoher Last und niedriger erneuerbaren Erzeugung im europäischen Strombinnenmarkt,

   - systemtechnisch verfügbaren Möglichkeiten zum internationalen Stromaustausch in Engpasssituationen,

   - ausreichender politischer Vereinbarungen bezüglich der Möglichkeit, diese noch zu treffen, um in Engpasssituationen eine ausreichende Stützung mit Erzeugungsleistung aus dem Ausland zu erhalten.

4. Inwieweit ist Deutschland bereit, aus Effizienzgründen seltene und extreme Wetterereignisse nicht mehr abzusichern, sondern gegebenenfalls **Versorgungsausfälle in überschaubarem Maß** zu akzeptieren?

Aus der Gestaltung des Stromversorgungssystems als Antwort auf die oben genannten Fragen ergibt sich der erforderliche Bedarf an „gesicherter Leistung“. Diese kann als steuerbare Erzeugungsleistung unabhängig vom Dargebot von Wind- oder Sonnenenergie zur Deckung der Stromnachfrage genutzt werden.

Methodik zur Untersuchung der Versorgungssicherheit in der dena-Leitstudie

Um die für die Versorgungssicherheit notwendigen Kraftwerkskapazitäten in Deutschland zu bestimmen, hat die dena-Leitstudie zwei Extremereignisse untersucht: die im Jahresverlauf auftretende, durch ausreichend Leistung zu deckende Jahreshöchstlast und die summenmäßige energetische Deckung einer zweiwöchigen kalten Dunkelflaute.

- **Jahreshöchstlast:** Gemeint ist der Zeitpunkt der höchsten Stromlast im Jahr, die sich aus der Stromnachfrage aller einzelnen Anwendungen maximal im Gesamtsystem und meistens am späten Nachmittag in einer kalten Winterwoche ergibt. Neben der maximalen Last der einzelnen Nachfrageprofile ist die Gleichzeitigkeit der Nutzung unterschiedlicher Anwendungen maßgeblich. Mit zunehmender Elektrifizierung des Energiesystems steigt die Jahreshöchstlast über die untersuchten Jahre hinweg an. Die Jahreshöchstlast wird durch Maßnahmen zur verbraucherseitigen Beeinflussung und Verschiebung des Energiebedarfs (Demand Side Management), Speicher und gesicherte Kraftwerkskapazitäten (inklusive dezentraler Erzeugungsanlagen und Kraft-Wärme-Kopplung) gedeckt werden. Für die nicht steuerbaren Erzeugungsanlagen aus erneuerbaren Energien werden als Beitrag zur Deckung der Jahreshöchstlast 1 Prozent der installierten Leistung von Onshore-Wind und 10 Prozent von Offshore-Wind berücksichtigt. Photovoltaik leistet keinen Beitrag. Zusätzlich wurden nach Diskussion der Partner im Modulsteuerkreis Energieimporte aus dem europäischen Ausland in Höhe von bis zu 5 GW angenommen.

- **Dunkelflaute:** Für die Untersuchung der „kalten Dunkelflaute“ wurde auf Basis historischer Einspeiseprofile der Beitrag von Wind und Photovoltaik während einer zweiwöchigen Phase mit niedriger Einspeisung betrachtet. Während dieser Zeit leisten Windenergieanlagen (Onshore und Offshore) durchschnittlich je 10 Prozent ihrer Leistung, Photovoltaikanlagen durchschnittlich 3 Prozent. Gleichzeitig gibt es aufgrund niedriger Temperaturen von durchschnittlich minus 3 °C eine vergleichsweise konstant hohe Wärme- und Stromnachfrage. Stromimporte, Stromspeicher und Demand Side Management leisten in dieser Zeit einen Beitrag, um Last und Deckung der Leistungsspitzen gleichmäßig zu verteilen, tragen aber entsprechend den getroffenen Annahmen nicht absolut zur erforderlichen Energiemenge bei.

Im Modell der dena-Leitstudie muss der Erzeugungsmix stets ausreichen, um beide kritische Situationen abdecken zu können. Eine weiter gehende Verfügbarkeit von Speichern kann den ausgewiesenen Bedarf an gesicherter Leistung durch Kraftwerke weiter senken. Hierzu gehören Speicher, die eigenständig auf implizite Signale (beispielsweise Strompreisschwankungen) reagieren oder gesteuerte Nachfrageflexibilität anbieten (Demand Side Management).

Die durchschnittliche **Spitzenleistung während der zweiwöchigen kalten Dunkelflaute** beträgt im Jahr 2050 etwa 90 GW in den Technologiemixszenarien beziehungsweise 150 GW in den Elektrifizierungsszenarien. Der Leistungsbedarf ist jeweils zum überwiegenden Teil aus Gebäudesektor und Industrie bedingt. Gedeckt wird der Leistungsbedarf in der kalten Dunkelflaute insbesondere durch Gaskraftwerke (65 beziehungsweise 120 GW in 2050). Sie sind eine vergleichsweise kostengünstige und bei Verwendung von klimafreundlichen synthetischen Brennstoffen emissionsfreie Option zur Bereitstellung der notwendigen Leistung, wenn andere Optionen wie Stromimporte nur begrenzt zur Verfügung stehen.

Ein relevanter Parameter bei der Berechnung der notwendigen gesicherten Leistung ist, bis zu welcher Höhe auf **Stromimporte aus dem europäischen Ausland** gesetzt werden kann. Während manche Studien Importkapazitäten zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit nicht oder nur gering berücksichtigen, gehen andere Studien auch während einer Dunkelflaute in Deutschland von weitreichend verfügbaren Stromimporten aus dem europäischen Stromnetz aus: In den vom Bundeswirtschaftsministerium beauftragten Langfrist- und Klimaszenarien beträgt die Importleistung beispielsweise auch in der Dunkelflaute in der Spitze rund 50 GW Strom. In der dena-Leitstudie wurde die eher restriktive Annahme definiert, dass zur Deckung des Leistungsbedarfs Stromimporte mit maximal 5 GW Leistung möglich sind.

Eine wichtige Voraussetzung für Versorgungssicherheit ist das weitere Zusammenwachsen des europäischen Strombinnenenergiemarkts. Dies ermöglicht, sich in Knappheitssituationen gegenseitig zu stützen, Leistung grenzübergreifend bereitzustellen und so Kraftwerksbedarfe innerhalb der EU für die einzelnen Mitgliedsstaaten zu senken. Herausforderung ist dabei die EU-weit hohe Gleichzeitigkeit von Dunkelflaute und hoher Nachfrage, zum Beispiel aufgrund zunehmender Elektrifizierung.

Methodik zur Untersuchung der Versorgungssicherheit auf europäischer Ebene

Ein alternativer Ansatz zur Prüfung der Versorgungssicherheit sind wahrscheinlichkeitsbasierte Verfahren, wie sie bereits seit 2017 durch den Verband Europäischer Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E und im Rahmen des Pentalateralen Energieforums angewendet werden. Auch im EnWG § 51 zum Monitoring der Versorgungssicherheit durch das BMWi wird der Einsatz wahrscheinlichkeitsbasierter Ansätze gesetzlich vorgeschrieben. Dabei wird angenommen, dass in ihrem Umfang begrenzte, kurze Stromunterdeckungen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit akzeptiert werden können. Außerdem wird Versorgungssicherheit gemeinsam auf europäischer Ebene bereitgestellt. Durch die Ausgleichseffekte bei der Stromnachfrage und der Erzeugung aus erneuerbaren Energien müssen für die einzelnen Mitgliedsstaaten geringere Kraftwerkskapazitäten vorgehalten werden als bei einer rein nationalen Betrachtung.

Eine weiterführende Studie sollte untersuchen, welcher Beitrag zur Absicherung einer langen, kalten Dunkelflaute erforderlich ist und ob dieser durch Stromimporte geleistet werden kann.

2.7 Wie wird sich die Energieinfrastruktur verändern?

Im Energiesystem der Zukunft kommen weiterhin unterschiedliche Energieträger wie Strom, verschiedene flüssige und gasförmige Energieträger sowie Nah- und Fernwärme zum Einsatz. Die bestehenden Infrastrukturen für den Transport und die Verteilung werden also auch künftig benötigt. Für eine kostenoptimierte Ausgestaltung der Energiewende ist es notwendig, diese Infrastrukturen bestmöglich auszulasten und weiterzuentwickeln. Bei steigendem Bedarf sollten sie gegebenenfalls ausgebaut werden.

Stromnetze ausbauen und weiterentwickeln

Die Stromübertragungsnetze müssen über die aktuellen Netzentwicklungsplanungen hinaus deutlich verstärkt und ausgebaut werden, um die zukünftig immer größeren Mengen erneuerbaren Stroms integrieren zu können und die Ausweitung des EU-Strombinnenmarkts zu ermöglichen. Je nach Szenario unterscheiden sich die über den heute bereits geplanten Stromnetzausbau hinausgehenden Infrastrukturkosten auf Übertragungsnetzebene zwischen 79 und 107 Milliarden Euro.[22] Die Verteilnetze müssen ebenfalls erweitert werden, um neben den steigenden Anteilen erneuerbarer Energien höhere Lasten durch neue Stromanwendungen wie Elektromobilität und Wärmepumpen aufnehmen zu können. Die Mehrkosten auf Verteilnetzebene betragen je nach Szenario zwischen 146 und 253 Milliarden Euro.[23]

Zur besseren Auslastung und zu einer intelligenten Nutzung von Flexibilität auf den verschiedenen Netzebenen müssen sukzessive innovative Konzepte für die Betriebsführung entwickelt und implementiert werden. Dazu gehören die aktive Nutzung dezentraler Energieerzeuger und -speicher durch die Netzbetreiber sowie Regelungen für die Integration potenziell großer Mengen von Elektroautos und Wärmepumpen. Für diese neuen Ansätze bedarf es eines höheren Automatisierungsgrades bei der Systemführung und mehr Koordination zwischen den Beteiligten. Insbesondere auf Verteilnetzebene ist wesentlich mehr intelligente Mess- und Steuerungstechnik als heute nötig. Innovative Konzepte und die erhöhte Nutzung von Flexibilitätskapazitäten sind auch zur Begrenzung der Ausbaukosten erforderlich.

Bestehende Infrastrukturen für Gas, Wärme und flüssige Energieträger effizient nutzen

Die Vorteile eines Transformationspfades mit einem breiteren Technologiemix lassen sich nur nutzen, wenn ausreichend Energieinfrastrukturen für Strom, Gas, Fernwärme und flüssige Energieträger vorhanden sind und bestehende Infrastrukturen bestmöglich ausgelastet und eingesetzt werden. Dies ist Grundvoraussetzung für eine kosteneffiziente und robuste Energiewende.

[22] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 217.
[23] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 221.

Der Übergang in das mittel- und langfristig klimafreundliche Energiesystem erfolgt durch vermehrten Einsatz von erneuerbaren synthetischen Kraft- und Brennstoffen. Für das Gasnetz gelingt dies zunächst durch eine stärkere Integration von Wasserstoff durch Beimischung und zumindest in Teilen Überführung in eine Wasserstoffinfrastruktur sowie die Umrüstung von Tankstellen für den neuen Energieträger. Je nachdem wie sich der Antriebsmix im Verkehrsbereich entwickelt, wird auch zukünftig ein relevanter Anteil der Mobilitätsnachfrage auf der Infrastruktur für flüssige Kraftstoffe basieren. Die Infrastrukturen für flüssige Energieträger können heute flüssige erneuerbare synthetische Kraftstoffe ohne Umrüstungsaufwand aufnehmen.

Für die Gasnetze besteht die Herausforderung, dass die Gasnachfrage bis 2050 bei den Elektrifizierungsszenarien sinken wird, selbst bei einem stärkeren Einsatz von Wasserstoff und synthetischem Methan. Hierfür gibt es mehrere Ursachen: Hierzu zählen die künftig geringere Stromerzeugung aus Gaskraftwerken sowie der im Gebäudebereich gesunkene Energiebedarf durch Sanierungen und Heizungsmodernisierung mit Umstellung auf Strom/Gas-Hybridheizungen oder Wärmepumpen. Während die Gasnachfrage in den Elektrifizierungsszenarien von rund 790 TWh/a im Jahr 2015 auf 500 beziehungsweise 680 TWh/a im Jahr 2050 sinkt, bleibt der Gasbedarf in den untersuchten Technologiemixszenarien konstant beziehungsweise steigt sogar auf bis zu 877 TWh/a.[24] Bei sinkender Auslastung des Gasnetzes steigen die Infrastrukturkosten für die verbleibenden Netznutzer.

Für die Fernwärmenetze ergibt sich in den Szenarien durch Sanierungen und Energieeffizienzsteigerungen zwar ein niedrigerer Wärmebedarf, allerdings ist dies über alle Szenarien hinweg mit einer steigenden Anzahl an Hausanschlüssen verbunden. Daher ist zukünftig nicht von einem Rückbau der Fernwärmenetze auszugehen.[25] Durch die Umstellung von Kohle auf zunächst Erdgas und perspektivisch erneuerbar produziertes synthetisches Gas kann Fernwärme immer CO_2-ärmer werden. Bereits heute sollten Fernwärmenetze für geringere Nutztemperaturen umgebaut werden und verstärkt auch industrielle Abwärme aufnehmen.

Handlungsempfehlungen

- **Verständnis für Stromnetzausbau fördern, Verfahren beschleunigen:** Bund und Länder sollten bei der Bevölkerung kontinuierlich und geschlossen für die Notwendigkeit des Stromnetzausbaus werben. Genehmigungsverfahren sollten weiter beschleunigt werden.

- **Automatisierung und intelligente Netzbetriebsmittel voranbringen:** Auf Ebene der Übertragungsnetze sollte geprüft werden, welche zusätzlichen Potenziale für die bessere Auslastung der Netze erschlossen werden können, etwa durch einen höheren Automatisierungsgrad bei der Systemführung, den verstärkten Einsatz intelligenter Netzbetriebsmittel wie Phasenschieber oder statische Kompensatoren sowie durch neue Konzepte wie Netzbooster.

- **Planung der Strom- und Gasnetze verschränken:** Die Bundesregierung sollte prüfen, wie sich die Planung von Energieinfrastrukturen mittelfristig stärker im Sinne einer integrierten Energiewende weiterentwickeln lässt. So sollten etwa die Betreiber der Stromübertragungsnetze und der Gasfernleitungsnetze ihre bisher getrennten Planungen in Zusammenarbeit mit der Bundesnetzagentur mittelfristig stärker miteinander verschränken. Erster Schritt könnte eine gemeinsame Szenarioentwicklung für das Strom- und Gasnetz sein. Auf europäischer Ebene wurde dies in den aktuellen „TYNDP Gas und Electricity Joint Scenarios“ 2018 erstmalig umgesetzt. Zudem sollte die Bundesregierung die Möglichkeiten für eine stärker integrierte Netzplanung der Strom- und Gas-Verteilnetzbetreiber prüfen.

- **Netzregulierung weiterentwickeln:** Die Bundesregierung sollte in Zusammenarbeit mit der Bundesnetzagentur die Anreizregulierung weiterentwickeln, vorbereitend für die nächste Regulierungsperiode (2023 bis 2027). Dabei sollte sie für eine ausgewogenere Anreizwirkung bezüglich CAPEX/OPEX-intensiven Lösungen zur Steigerung der Intelligenz im Verteilnetz sorgen und einen Handlungsrahmen für die Netzbetreiber für den netzdienlichen Zugriff auf Flexibilitäten wie Demand Side Management, Speicher oder Elektrofahrzeuge schaffen.

  Die Anreizregulierung für die Gasnetze sollte den Umbau der Gasinfrastruktur hin zu höheren Anteilen von Wasserstoff unterstützen und ermöglichen.

[24] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 222.
[25] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 222 ff.

2.8
Welche Stellschrauben beeinflussen die Energiewende im Verkehr?

Die Energiewende im Verkehr war bisher in Deutschland nicht besonders erfolgreich. Wenn der Verkehr bis 2030 einen relevanten Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten soll, wie es der Klimaschutzplan der Bundesregierung vorsieht, müssen umgehend wirksame Maßnahmen in den Bereichen nachhaltige Mobilität, erneuerbare Kraftstoffe und alternative Antriebe eingeleitet werden.

Die Steigerung der Antriebseffizienz ist der maßgebliche Hebel zur spezifischen Emissionsreduktion. Gleichwohl sind die Klimaziele nur mit einem deutlich steigenden Anteil CO_2-armer erneuerbarer Kraftstoffe erreichbar. Kurz- und mittelfristig spielen nachhaltige Biokraftstoffe weiterhin eine wichtige Rolle, sie verlieren jedoch im Vergleich zu anderen erneuerbaren Kraftstoffen sukzessive an Bedeutung. Bei flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen muss ein Großteil des Energiebedarfs durch synthetische erneuerbare Kraftstoffe gedeckt werden. Das Verkehrsaufkommen sollte durch innovative Mobilitätsdienstleistungen, angepasste Produktionssysteme sowie nachhaltige Stadt- und Regionalplanung begrenzt und bestenfalls auch reduziert werden.

Effizienz ist der wichtigste Hebel, um die Ziele in allen Szenarien zu erreichen

Die Bedeutung der Antriebseffizienz ist in allen Szenarien deutlich. Selbst im Referenzszenario mit 69 Prozent reinen Verbrennungsfahrzeugen im Pkw-Bestand lässt sich bis 2050 eine Treibhausgasreduktion im Verkehrssektor von 39 Prozent im Vergleich zu 1990 erreichen.[26] Dies ist möglich, weil der spezifische Energieverbrauch von Benzin-, Diesel- und CNG-Pkw gemäß Studienannahmen bis 2050 um gut 25 Prozent sinkt. Teilelektrifizierte Antriebe sparen im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren je nach Fahrprofil weitere 30 bis 50 Prozent ein. Das Potenzial rein batterieelektrischer und wasserstoffbetriebener Antriebe zeigt sich in der Endenergiereduktion in den das Klimaziel erreichenden Szenarien: Bis 2030 erfolgt hier eine Reduzierung des Endenergiebedarfs um 20 bis 28 Prozent gegenüber 12 Prozent im Referenzszenario. Infolge der Energieeinsparungen benötigt der Verkehrssektor in den klimazielerreichenden Szenarien im Jahr 2050 rund 90 bis 160 TWh weniger Endenergie als das Referenzszenario.[27]

Kein Erreichen des Klimaziels im Schwerlastverkehr ohne synthetische Kraftstoffe

Alternative Antriebe kommen aktuell zunehmend im Bereich leichter Nutzfahrzeuge auf den Markt. Für den Transport schwerer Güter auf der Straße und über lange Distanzen sind LNG-Lkws die einzige marktreife Alternative. Im Regionalverkehr sind neben Gasantrieben auch batterieelektrische sowie perspektivisch brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge eine Nutzungsoption.

Ein Ersatz fossiler Energieträger im Straßenverkehr ist über die Nutzung klimafreundlicher flüssiger oder gasförmiger Kraftstoffe zu erreichen. Hierzu stehen mittelfristig vorwiegend Biokraftstoffe zur Verfügung. Sollen die Treibhausgasemissionen maßgeblich sinken, führt im Schwerlastverkehr an synthetischen Kraftstoffen kein Weg vorbei. In den Szenarien, die die Klimaziele erreichen, müssten bis zu 84 TWh im Straßenschwerlastverkehr über klimafreundliche synthetische Kraftstoffe gedeckt werden.[28] PowerFuels werden auch benötigt, wenn Oberleitungshybrid-Lkw und brennstoffzellenelektrische Lkw eine hohe Marktdurchdringung erreichen sollten (siehe „Diskurs: Oberleitungshybrid-Lkw“).

Allerdings zeigen die Modellergebnisse, dass die Nutzung von synthetischen Kraftstoffen ohne hohe Antriebseffizienz zu Kostennachteilen führen kann. So steigen die Kosten des Szenarios mit einem breiten Technologie- und Energieträgermix gegenüber dem Szenario mit einem hohen Grad von vollelektrischen Antrieben in den Jahren 2040 bis 2050 aufgrund des höheren Bedarfs synthetischer Kraftstoffe an.

Neben dem Straßengüterverkehr wird die Nachfrage nach synthetischen Kraftstoffen vor allem in der Schifffahrt und der Luftfahrt steigen. Ohne deren umfassenden Einsatz lässt sich das 95-Prozent-Klimaziel nicht erreichen.

Die Lkw-Antriebsentwicklung bedarf politischer Grundsatzentscheidungen

Der Anteil des Endenergieverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen am Gesamtenergieverbrauch wird bedingt durch ein weiteres Wachstum der Verkehrsleistung zunehmen. Mit hocheffizienten diesel- und gasbetriebenen Fahrzeugen könnte der Energieverbrauch von schweren Lkw (größer 12 t) im Referenzszenario bis 2030 um 10 Prozent, bis 2050 um 23 Prozent reduziert werden. Die klimazielerreichenden Szenarien ermöglichen 29 bis 38 Prozent Endenergiereduktion bis 2050. Im Fall eines Markthochlaufs von Oberleitungshybrid-Lkw könnte der Endenergieverbrauch im Jahr 2050 sogar um 49 Prozent gegenüber 2015 sinken.

[26] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 139.
[27] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 131.
[28] ewi-Berechnungen für ewi-Gutachterbericht (2018).

Handlungsempfehlungen

- **Konsistente Strategie verfolgen:** Um die Klimaziele im Verkehrssektor zu erreichen, muss ein Bündel von Maßnahmen umgesetzt werden. Eine einzelne Maßnahme kann nicht zum Erfolg führen. Ziel muss sein, Verkehre zu vermeiden, wo möglich auf klimafreundliche Verkehrsmittel zu verlagern und die Antriebe und Kraftstoffe zu verbessern.

- **Markt für effiziente Antriebe voranbringen:** Der Steigerung der Effizienz aller Antriebe kommt eine besondere Bedeutung zu. Die Bundesregierung sollte ambitionierte CO_2-Flottenziele auf EU-Ebene unterstützen und gleichzeitig die Entwicklung der benötigten öffentlichen Infrastruktur in Gang bringen. Die Anrechnung des Einsatzes von synthetischen Kraftstoffen auf die CO_2-Flottenziele der Fahrzeughersteller könnte eine Option sein, um eine frühe Marktentwicklung dieser Energieträger über den Sektor der höchsten Zahlungsbereitschaft anzureizen. Für die Produzenten synthetischer Kraftstoffe könnte sich neben der Nachfrage am Treibhausgas-Quotenmarkt ein zusätzlicher Kundenkreis entwickeln. Allerdings müssten Doppelförderungen, zum Beispiel durch Erlöse über die Treibhausgas-Minderungsquote vermieden und eine belastbare Systematik der pro Fahrzeug über die gesamte Lebensdauer zu vermeidenden Treibhausgasemissionen abgestimmt werden.

- **Anreize für Dienstwagen schaffen:** Insbesondere in Deutschland kann die Verbesserung der Antriebseffizienz durch eine differenzierte Dienstwagenbesteuerung unterstützt werden. Diese sollte sich technologieneutral am spezifischen CO_2-Ausstoß der Fahrzeuge orientieren und für den Bundeshaushalt aufkommensneutral sein. Die öffentliche Hand sollte bei der Beschaffung von CO_2-armen Dienstwagen eine Vorbildrolle einnehmen.

- **Steuersätze vereinheitlichen und auf CO_2-Ausstoß ausrichten:** Kurz- und mittelfristig sollten unterschiedliche Energiesteuersätze verschiedener fossiler Kraftstoffe beseitigt werden und stattdessen die CO_2-Intensität der Kraftstoffe eine größere Bedeutung in der Abgabensystematik erhalten. Der Preis pro Einheit CO_2 sollte über die nächsten Jahre schrittweise deutlich ansteigen. Mit den Einnahmen können die Entwicklung und der Markthochlauf alternativer Antriebe und Kraftstoffe unterstützt werden.

- **Ambitionierte Quote für erneuerbare Kraftstoffe einführen:** Da erneuerbare Kraftstoffe mittelfristig teurer sind als fossile, gleichzeitig jedoch wesentlich zur Treibhausgasminderung beitragen, sollte die Bundesregierung auf EU-Ebene im Rahmen der Verhandlungen zur Weiterentwicklung der Renewable Energy Directive eine ambitioniertere Quote für fortschrittliche und synthetische erneuerbare Kraftstoffe (inklusive PowerFuels) fordern. Gleichzeitig sollte sie Ausschreibungen für den Aufbau von großen Power-to-X-Anlagen in Erwägung ziehen. Ausschreibungen könnten die Unsicherheit der Anlagenbetreiber reduzieren und dazu beitragen, erneuerbare synthetische Kraftstoffe schrittweise in den Markt zu bringen.

- **Emissionsarme Lkw bei Maut entlasten:** Für den Schwerlastverkehr ist die Maut ein entscheidender Kostenfaktor. Der Einsatz emissionsarmer Lkw mit alternativen Antrieben sollte durch eine deutliche Differenzierung der Maut im Vergleich zu Diesel-Lkw attraktiver werden.

- **Standards für systemdienliches Laden setzen, Abrechnung vereinfachen:** Kurzfristig sollten Standards und Dienstleistungen geschaffen werden, die systemdienliches Laden von Elektrofahrzeugen ermöglichen, um die Netze nicht zu überfordern und die gesicherte Leistung in Spitzenlastzeiten zu reduzieren. Zur Förderung der Elektromobilität ist eine Vereinfachung des Eichrechts notwendig; derzeit ist die Abrechnung von Lademengen nach kWh erschwert. Hier sollten die Anforderungen an Hard- und Software vereinfacht und geklärt werden.

- **Europaweites Potenzial von Oberleitungshybrid-Lkw analysieren:** Neben einer Anschubfinanzierung von LNG-Nutzfahrzeugen sollte in den nächsten Jahren die Wirkung und Akzeptanz von Oberleitungshybrid-Lkw in Praxisprojekten getestet werden. In einer EU-weiten Analyse sollten Einsatzfelder und Transportkorridore untersucht werden, die einen Mehrwert zur kosteneffizienten Emissionsreduktion leisten können.

Diskurs: Oberleitungshybrid-Lkw

Chancen und Herausforderungen von Oberleitungshybrid-Lastkraftwagen (OH-Lkw) werden derzeit intensiv diskutiert. Der Modulsteuerkreis Mobilität der dena-Leitstudie hat daher beschlossen, im Rahmen der Modellierungen die **Effekte eines Markthochlaufs inklusive des zugehörigen Infrastrukturausbaus** auf die Szenarien zur Erreichung des 95-Prozent-Ziels mit einer Sensitivitätsrechnung untersuchen zu lassen.[29] Dieser Diskurs bildet die innerhalb der Studienpartner sowie mit externen Stakeholdern geführten Diskussionen zum Thema Oberleitungshybrid-Lkw ab.

Oberleitungshybrid-Lkw **können eine geeignete Technologieoption sein**, um den schweren Straßengüterfernverkehr zu elektrifizieren. Bei diesem Verfahren werden die Fahrzeuge mittels eines Stromabnehmers über eine Oberleitungsinfrastruktur mit Strom für einen elektrischen Antrieb mit Pufferspeicher versorgt. Zusätzlich haben die Fahrzeuge für Fahrten außerhalb des Oberleitungssystems einen Sekundärantrieb, beispielsweise batterie- beziehungsweise brennstoffzellenelektrisch oder mit Gas- beziehungsweise Diesel-Verbrennungsmotor. Aus heutiger Sicht könnten Diesel-Oberleitungshybrid-Antriebe die attraktivste Kombination sein: Sie haben die geringsten Investitionskosten bei hoher Flexibilität. Oberleitungshybrid-Lkw sind für logistische Bereiche mit hohen Laufleistungen auf viel befahrenen Straßen wie Autobahnen interessant. Sie sollen infolge des höheren Wirkungsgrads des elektrischen Antriebsstrangs sowie der verstärkten Direktverwendung von erneuerbarem Strom ohne Umwandlungsverluste niedrigere Energieverbräuche erreichen.

Derzeit sind **erste Teststrecken auf deutschen Autobahnen** im Aufbau, beispielsweise auf der A1 zwischen Lübeck und Reinfeld sowie auf der A5 zwischen Frankfurt-Flughafen und Darmstadt. Auch international wird die Nutzung erprobt, beispielsweise in Kalifornien und Schweden. Die Einführung der Technologie könnte schrittweise über einen polyzentrischen Ansatz erfolgen: In einem ersten Schritt werden Oberleitungen in Regionen mit hohem Verkehrsaufkommen und geeigneten regionalen Schwerlast(pendel)verkehren aufgebaut. Für die überregionale Abdeckung erfolgt danach eine kontinuierliche Verbindung der einzelnen Schwerpunkte.

Vorteile hinsichtlich Endenergieeffizienz, Systemkosten sowie Klima- und Umweltschutz

Der Einsatz von Oberleitungshybrid-Lkw verdrängt andere Antriebstechnologien im Schwerlastverkehr und führt zu einer **Reduzierung des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor.** In der Sensitivitätsuntersuchung im Rahmen der dena-Leitstudie steigt der Strombedarf des Verkehrssektors in den untersuchten Szenarien in 2050 um 18 bis 33 TWh. Gleichzeitig sinkt der Bedarf an Wasserstoff, Methan und Diesel um 31 bis 46 TWh. Der gesamte Endenergiebedarf des Verkehrssektors ist geringer.[30]

Trotz zusätzlicher Kosten für Infrastruktur und erhöhte Stromimporte weist die Sensitivitätsrechnung mit Oberleitungshybrid-Lkw **insgesamt niedrigere Gesamtkosten** aus als die zugrunde liegenden Basisszenarien: Im Vergleich zum Elektrifizierungsszenario beträgt die Einsparung bis zum Jahr 2050 rund 21 Milliarden Euro. Ursächlich sind im Verkehrssektor die Verdrängung von brennstoffzellenelektrischen Lkw durch weniger kapitalintensive Diesel-Oberleitungshybrid-Lkw sowie gesunkene Kapitalkosten im Energiesektor durch niedrigere Kapazitäten von **Elektrolyseuren** und Stromerzeugung aufgrund des geringeren Wasserstoffbedarfs. Im Vergleich zum Technologiemixszenario sinken die Gesamtkosten bis 2050 um etwa 23 Milliarden Euro, insbesondere durch niedrigere Importe von Power-to-X-Kraftstoffen.[31]

In den beiden der Sensitivitätsuntersuchung zugrunde liegenden Basisszenarien muss der Verkehrssektor seine Treibhausgasemissionen bereits vollständig reduzieren. Diese Technologieeinführung hat damit in der Modellierung keine Auswirkungen auf die Klimawirksamkeit des Verkehrssektors, könnte aber ebenso einen Beitrag leisten wie die jetzt modellierten Alternativen. Unabhängig davon kann der Oberleitungshybrid-Lkw jedoch erhebliche **Reduzierungen lokaler Umweltemissionen** bewirken: Bei Nutzung des elektrischen Antriebsstrangs lassen sich Feinstaub sowie Stickoxid-Emissionen (NOX) aus den Motorabgasen vollständig vermeiden, zudem sind bei niedrigen Geschwindigkeiten die Lärmemissionen sehr gering. Ist der Sekundärantrieb nicht elektrisch, wirken diese Vorteile jedoch nicht bei Fahrten abseits der Oberleitungen, beispielsweise bei innerstädtischen Belieferungen.

[29] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 304 ff.
[30] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 307.
[31] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 310.

Bedenken hinsichtlich betrieblicher Wirtschaftlichkeit, Praktikabilität und Umsetzbarkeit

Aus der Modellierung ergeben sich Vorteile von Oberleitungshybrid-Lkw bei der Endenergieeffizienz, den Systemkosten sowie dem Klima- und Umweltschutz. Gleichzeitig haben die Diskussionen im Rahmen der dena-Leitstudie einige grundsätzliche Bedenken verdeutlicht. Infrage stehen insbesondere die betriebliche Praktikabilität, die tatsächlichen betriebswirtschaftlichen Vorteile sowie Kosten und Umsetzbarkeit der notwendigen Oberleitungsinfrastruktur.

Das **„Henne-Ei-Problem" gilt oft als die größte Herausforderung.** Damit ist gemeint: Der kapitalintensive Aufbau der Oberleitungsinfrastruktur ist erst dann wirtschaftlich, wenn viele Fahrzeuge sie nutzen. Die sind aber nur dann vorhanden, wenn ein **Mindestmaß an Oberleitungen auf öffentlichen Straßen** existiert. Es braucht ausreichend Oberleitungsstrecken, um die notwendige Flexibilität in der betrieblichen Disposition zu erhalten und unabhängig vom jeweiligen Tagesstreckenprofil einen ausreichend großen Fahrtanteil mit elektrifizierten Strecken zu erreichen. LNG- oder brennstoffzellenelektrische Lkw können dagegen aus betrieblicher Sicht schon bei einer geringen Anzahl von Tankstellen eingesetzt werden, wenn die Reichweiten der Fahrzeuge ausreichend groß sind.

Durch den Wegfall von Grenzkontrollen, die Verfügbarkeit international tätiger Arbeitskräfte und den hohen Grad an Kabotagefreiheit innerhalb der EU werden **Straßengüterverkehre vermehrt durch internationale Akteure** durchgeführt: In Deutschland erbringen außerhalb Deutschlands zugelassene Fahrzeuge die Hälfte der Güterverkehrsleistung. Ein Oberleitungssystem kann deshalb nur erfolgreich sein, wenn es auch nicht deutsche Lkw-Betreiber nutzen. Der Aufbau muss international adressiert und abgestimmt sein.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind die **Gesamtkosten eines Lkw über die gesamte Lebensdauer** relevant. Diese bestehen aus den Anschaffungskosten, den laufenden Kosten für Betrieb, Wartung und Unterhalt sowie den Kosten am Nutzungsende durch Verkauf oder Verschrottung. Die Investitionskosten eines Diesel-Oberleitungshybrid-Lkw liegen im Jahr 2030 nach aktueller Abschätzung etwa 18 Prozent über denen eines reinen Diesel-Lkws, sind aber günstiger als ein gasbetriebener Lkw (-4,6 %) und deutlich günstiger als ein batterieelektrischer Lkw (-21 %) und ein brennstoffzellenelektrischer Lkw (-36 %).[32] Für Betrieb, Wartung und Unterhalt von Oberleitungshybrid-Lkw sind bei überwiegender Nutzung des elektrischen Antriebsstrangs etwas günstigere Gesamtkosten zu erwarten. Die Kosten am Nutzungsende sind davon abhängig, ob ein Weiterverkauf möglich ist. Der Wiederverkaufswert hängt maßgeblich von Vorhandensein und Größe eines internationalen Zweitmarkts ab. Da ein solcher Zweitmarkt für Oberleitungshybrid-Lkw fehlt, müssten die Fahrzeuge vor einem Weiterverkauf umgerüstet werden; sie würden nach Demontage des Stromabnehmers zu einem „normalen" Hybrid-Lkw. Dies könnte sich in einer frühen Marktentwicklungsphase negativ auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirken.

Die **Auswirkungen von Oberleitungshybrid-Lkw auf das Energiesystem** lassen sich derzeit nur auf Basis von Studien und Annahmen abschätzen. Bisher gibt es keine empirischen Daten dazu, in welcher Form sich Oberleitungshybrid-Lkw in der Praxis zeitlich differenziert auf das regionale Stromsystem und dessen Versorgungssicherheit auswirken. Erste Studien gehen davon aus, dass die Lastprofile gut mit dem zeitlichen Einspeiseprofil von Photovoltaik-Anlagen übereinstimmen. Gerade auf regionaler Ebene können die zusätzlichen Strom- und Spitzenlastbedarfe infolge des Einsatzes von Oberleitungshybrid-Lkw deutlich divergieren; sie müssten daher bei einer Ausbauplanung in Betracht gezogen werden. Insgesamt sind die Auswirkungen auf das Energiesystem weiter zu untersuchen.

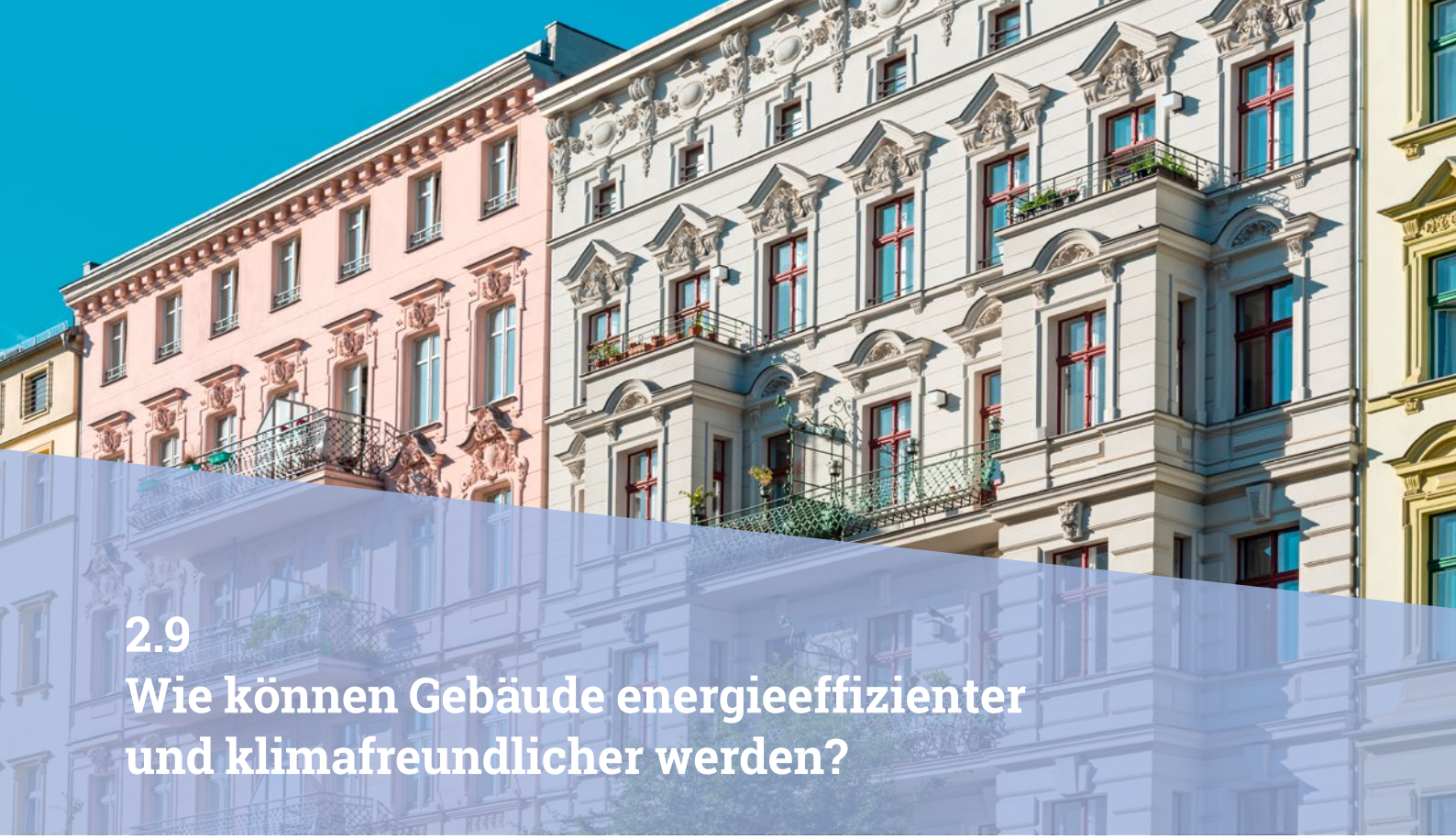
Voraussetzungen sind gesamtgesellschaftlicher Diskurs und internationaler Schulterschluss

Aus heutiger Sicht ist schwer abschätzbar, ob Oberleitungshybrid-Lkw ausreichende Akzeptanz erfahren werden, um die gewünschten **positiven Klima- und Umweltschutzeffekte** zu ermöglichen.

Wie bei anderen Technologien und Infrastrukturen muss die Entwicklung einer erfolgreichen Alternative zu dem heutigen dieselbetriebenen Straßengüterverkehr über **politische Weichenstellungen** und die Einbindung der für den Transport wichtigsten, europäischen Mitgliedstaaten durch **internationale Kooperationen** erfolgen. Soll das System seine positive Wirkung voll entfalten, muss es grenzüberschreitend auf den am stärksten frequentierten Straßen Europas aufgebaut werden. Nur eine entsprechende internationale Abdeckung kann dazu führen, dass auch ausländische Transporteure die neuen Fahrzeuge kaufen und zur Auslastung des Systems beitragen.

Wie hoch der Beitrag eines solchen EU-weiten Oberleitungssystems zur Senkung des Energieverbrauchs und der Emissionen des Straßengüterverkehrs in Deutschland und der EU wäre, müssten weitere Untersuchungen darlegen. Das neue System könnte zudem ein **industrie- und klimapolitisches Potenzial** für andere Regionen der Welt besitzen, die durch eine hohe Verkehrsnachfrage bei gleichzeitig starken Umweltemissionsproblemen charakterisiert sind.

[32] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 306.



2.9 Wie können Gebäude energieeffizienter und klimafreundlicher werden?

Der Gebäudesektor bietet große technische Potenziale für mehr Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien. Dies gilt in erster Linie für den Gebäudebestand. In allen Szenarien müsste die aktuell bei circa 1 Prozent liegende Sanierungsrate bei der Gebäudehülle deutlich erhöht werden, um die energie- und klimapolitischen Ziele bis 2050 erreichen zu können. Gleichzeitig ist der Gebäudesektor in hohem Maße heterogen, etwa bei der Eigentümer- und Nutzerstruktur, unterschiedlichen Gebäudetypen, dem energetischen Zustand der Gebäude sowie den eingesetzten Technologien und Energieträgern. Durch lange Investitionszyklen gibt es im Gebäudebereich besondere Anforderungen im Hinblick auf das Klimaziel 2050. Um den Gebäudesektor energieeffizienter und deutlich klimafreundlicher zu machen, bedürfen energetische Maßnahmen einer differenzierten Betrachtung. Nur so kann die gleichermaßen energetisch, sozial und wirtschaftlich beste Lösung für die Objekte beziehungsweise Quartiere gefunden werden.

Eine möglichst kosteneffiziente Energiewende im Gebäudebereich braucht Technologieoffenheit

Unter den Annahmen der Studie bietet ein technologieoffener Ansatz volkswirtschaftliche Kostenvorteile gegenüber einem Pfad, der auf eine fast vollständige Elektrifizierung des Gebäudesektors setzt. Wichtig ist in jedem Fall ein integrierter Ansatz aus Gebäudehülle und -technik bis hin zu einer gebäudeintegrierten Energieerzeugung, etwa über Aufdach-Photovoltaik oder Kraft-Wärme-Kopplung. Eine effektive Senkung des Heizwärme- und Kältebedarfs gelingt nur, wenn gleichzeitig unsanierte Gebäudehüllen energetisch saniert werden und eine höhere Effizienz der Anlagentechnik gewährleistet wird, verbunden mit dem Einsatz erneuerbarer Energien. Bei Fernwärmenetzen sollte der Umbau zu einer allgemeinen Temperaturabsenkung und einer Einbindung erneuerbarer Wärmeerzeugung unterstützt werden. Diese Aspekte gelten sowohl für den Neubau als auch, mit besonderer Dringlichkeit, für Bestandsgebäude.

Das Technologiemixszenario basiert auf geringeren Sanierungsraten[33] (Vollsanierungsäquivalente für die Gebäudehülle) als das Elektrifizierungsszenario (1,4 gegenüber rund 2 Prozent). Selbst eine Erhöhung auf 1,4 Prozent bedarf jedoch deutlich höherer Anstrengungen gegenüber heute. Ebenso wichtig ist die Austauschrate der Anlagentechnik. In der Studie sind dafür 3,5 Prozent pro Jahr angesetzt.

Die Energieträger im Gebäudebereich müssen durch den Zubau erneuerbarer Energien weiter dekarbonisiert werden, insbesondere in den 95-Prozent-Zielpfaden und bei den vertiefenden Untersuchungen zu Hemmnissen.[34] Im Technologiemixszenario kommt eine breitere Auswahl von Energieträgern zum Einsatz, während im Elektrifizierungsszenario Strom die dominierende Rolle spielt. In beiden Szenarien werden verstärkt erneuerbare Energieträger eingesetzt, vor allem über Wärmepumpen und durch den Einsatz von PowerFuels. Im Technologiemixszenario sind 2050 mindestens 6,5 Millionen Wärmepumpen notwendig, im Elektrifizierungsszenario sogar mindestens 16 Millionen. Zum Vergleich: Heute gibt es circa 800.000 Stück. Erneuerbare Energien bilden in jedem Fall ein tragendes Element der künftigen Wärme- und Kälteversorgung.

Die Studie zeigt auch, dass klimafreundliche synthetische Energieträger (PowerFuels) zunehmend an Bedeutung gewinnen müssen. Insbesondere für die 95-Prozent-Zielpfade geht dies mit einem erheblichen Import erneuerbarer synthetischer Energieträger einher. Durch die sukzessive Beimischung von flüssigen oder gasförmigen PowerFuels in die bestehenden Infrastrukturen können vorhandene technische Anlagen (zum Beispiel auch in Hybridsystemen) weiterhin genutzt werden. Spezifische Vorteile der bestehenden Infrastrukturen für feste und flüssige Brennstoffe erlauben eine besonders hohe Flexibilität in der Versorgung bei Nachfrageänderungen.

Zentrale Bedeutung des Gebäudesektors anerkennen und Investitionen anreizen

Die zusätzlichen Investitionen in Gebäudehülle und Technik sind in den technologieoffenen Szenarien mit 442 bis 450 Milliarden Euro niedriger als in den elektrischen Szenarien mit 890 bis 1.026 Milliarden Euro.[35] Ein wesentlicher Treiber hierfür sind die in den Szenarien angesetzten unterschiedlichen jährlichen Sanierungsraten mit 1,4 Prozent im Technologiemixszenario gegenüber rund 2 Prozent im Elektrifizierungsszenario und die damit verbundenen höheren Kapitalkosten. Die volkswirtschaftlichen Nettomehrkosten sagen hierbei noch nichts aus über die tatsächliche Leistungsfähigkeit und die Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf Gebäudeeigentümer und Mieter beziehungsweise weitere volkswirtschaftliche Effekte. Verteilungsfragen sowie die Wirtschaftlichkeit aus Sicht einzelner Akteure wurden in dieser Studie nicht beleuchtet, ebenso wenig Beschäftigungs- und Wachstumseffekte. Eine faire Verteilung dieser zusätzlichen Kosten spielt eine zentrale Rolle für die Akzeptanz der Energiewende im Gebäudesektor, weil hier ein großer Teil der volkswirtschaftlichen Investitionskosten anfällt.

Im Zusammenspiel des Gebäudesektors mit dem integrierten Energiesystem bietet die digitalisierte Steuerung neue Möglichkeiten, in größerem Umfang zur effizienten Nutzung technologieoffener Wärmeversorgungssysteme beizutragen. Weitere Flexibilisierungsoptionen entstehen durch die Langzeitspeicherfähigkeit von gasförmigen und flüssigen Energieträgern.

Eine differenzierte Betrachtung der Wärmeversorgung in Bezug auf Grund- und Spitzenlast ist sinnvoll. Technologieoffene Hybridsysteme sowie dezentrale Erzeugungs- und Speichersysteme werden eine zunehmend größere Rolle spielen, um unterschiedliche – zunehmend erneuerbare – Energieträger in das Wärmesystem zu integrieren. Dabei sind vor allem Fragen der Versorgungssicherheit und der Einfluss von besonderen Wetterperioden (beispielsweise der kalten Dunkelflaute) zu berücksichtigen.

Letztlich müssen auch das große Potenzial und die Heterogenitätder Nichtwohngebäude in die weitere Betrachtung und Entwicklung mit einbezogen werden.

[33] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 63.
[34] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 268 ff.
[35] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 250.

Handlungsempfehlungen

- **Pfade zur Zielerreichung technologieoffen halten:** Notwendig sind breite Innovationspfade sowie mehr Forschung und Entwicklung zur Förderung von Innovationen in zentralen Bereichen der Wärmeversorgung, etwa bei Power to Heat, Power to Gas, Power to Liquid, elektrischen und thermischen Speichern, Abwärmenutzung, Brennstoffzellen oder Wärmepumpen. Dies betrifft auch die Steuerung (Smart Building, Integration Eigenerzeugung), die Gebäudehülle (innovative Konstruktions- und Dämmmaterialien), die Bereitstellung der Energie sowie neue Geschäftsmodelle und Dienstleistungen. Es müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine kosteneffiziente Minderung der CO_2-Emissionen anreizen, beispielsweise im Rahmen des neuen Gebäudeenergiegesetzes.

- **Regulatorischen Rahmen einfach und effizient gestalten:** Um eine qualitativ hochwertige Umsetzung auch in der Breite zu gewährleisten, müssen die notwendigen Regularien und das Ordnungsrecht übersichtlich und möglichst unbürokratisch gestaltet werden. Dazu gehört unter anderem die Weiterentwicklung des Regulierungsrahmens für den Eigenstromverbrauch oder die Zusammenfassung von Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz, Energieeinsparverordnung und Energieeinsparungsgesetz zum Gebäudeenergiegesetz.

- **Fördermaßnahmen ausbauen:** Um eine signifikante Intensivierung der energetischen Gebäudesanierung anzustoßen, ist ein Fördermix aus Zuschüssen, Krediten und Steuerförderung notwendig. Vor dem Hintergrund durchschnittlicher jährlicher Mehrinvestitionen von ca. 13 bis 29 Milliarden Euro[36] gegenüber dem Referenzszenario ist eine deutlich höhere Gesamtfördersumme als Anreiz notwendig. Die geplante steuerliche Sanierungsförderung muss schnell eingeführt werden, um notwendige Sanierungsimpulse zu setzen. Die Weiterentwicklung der Förderstrategie sollte auch im Hinblick auf die Klimaziele 2030 einem möglichst technologieoffenen Ansatz folgen und alle Technologien berücksichtigen, die einen Beitrag zu mehr Energieeffizienz und zum verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien leisten, um eine effektive Investitions- und Sanierungswirkung zu erreichen.

- **Information und unterstützende Marktinstrumente verstärken:** Flankiert werden müssen diese Maßnahmen durch eine breite Kommunikation, eine spezifische Gebäudeenergieberatung und ein besseres Anreizsystem für individuelle Sanierungsfahrpläne, um ausreichende Transparenz und Akzeptanz sicherzustellen.

- **Qualifizierung verbessern:** Zu einer qualifizierten Beratung sowie einer fachgerechten Planung und Ausführung gehört ein entsprechendes Qualifizierungsniveau der Beteiligten. Daher sollten Anreize gesetzt werden, dass Berufsbilder und Ausbildungsordnungen den Anforderungen der Energiewende entsprechen.

- **Energieeffizienten Betrieb installierter Gebäudetechnik sicherstellen:** Effiziente Gebäudetechnik muss auch im Betrieb ihre technischen Potenziale ausschöpfen. Hier gibt es erhebliche Defizite, die zu erhöhtem Energieverbrauch führen. In diesem Zusammenhang wäre ein Monitoring der Anlagen von entscheidender Bedeutung. Anlagenbetreiber und Installationsbetriebe sollten motiviert und mit geeigneten Maßnahmen in die Lage versetzt werden, unnötig hohe Energieverbräuche feststellen und optimieren zu können.

- **Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden erhöhen:** Bisher nicht gehobene Energieeffizienzpotenziale im Bereich Nichtwohngebäude sollten erschlossen werden. Erforderlich sind eine gezielte Förderung, die kontinuierliche Weiterentwicklung passgenauer ordnungsrechtlicher Rahmenbedingungen sowie geeignete Informations- und Beratungsmaßnahmen.

- **Datenbasis verbessern:** Neben der energetischen Effizienzsteigerung muss auch die verfügbare Datenbasis substanziell und schnell verbessert werden, insbesondere bei Nichtwohngebäuden. Sowohl im Wohn- als auch im Nichtwohngebäudesektor sollte außerdem ein effektives marktbasiertes Monitoring implementiert werden, um die Wirksamkeit von Effizienzmaßnahmen besser bewerten und spezifische Maßnahmen ableiten zu können.

[36] dena (2017), Gebäudestudie, S. 46.

2.10 Welche Veränderungen sind im Industriesektor zu erwarten?

Mit den heute verfügbaren Technologien kann Deutschland bis 2050 über alle Sektoren hinweg allenfalls eine Treibhausgasreduktion von 62 Prozent erreichen – trotz der in diesem Referenzszenario bereits angenommenen ambitionierten Entwicklungen bezüglich der Energieeffizienz und der Nutzung alternativer Technologien in der Industrie.

Für die Erreichung des Klimaziels von 80 Prozent bedarf es stärkerer Anstrengungen bei der Einführung neuer Produktionsverfahren und der Steigerung der Energieeffizienz. Zum Teil führen neue, klimafreundliche Produktionsverfahren zu erhöhten Energiebedarfen, zum Beispiel hoher Strombedarf für Wasserstoffelektrolyse für die Ammoniakproduktion. Insgesamt ist aufgrund von Energieeffizienzsteigerungen jedoch von einer Reduktion des Energiebedarfs im gesamten Industriesektor von 26 bis 32 Prozent bis ins Jahr 2050 auszugehen. Die Effizienzsteigerungen haben neben der positiven Wirkung auf den CO_2-Ausstoß den Effekt, dass sie der Wirkung steigender Energiepreise auf die Produktionskosten entgegenwirken.

Eine hohe Energieeffizienz kann ein Wettbewerbsvorteil und ein Schutz vor Carbon Leakage sein.[37]

Zur Erreichung der 95-Prozent-Ziele müssten darüber hinaus grundsätzlich neue Technologien und Produktionsverfahren schnellstmöglich entwickelt und sukzessive eingesetzt werden. Dabei kann auch der Einsatz der umstrittenen CCS-Technologie in einem begrenzten Umfang notwendig sein, um nach derzeitigem Stand anderweitig nicht zu reduzierende Prozessemissionen der Industrie vermeiden zu können.

Zudem ist zu erwarten, dass die CO_2-Preise für Industrieunternehmen steigen werden. Ein steigender CO_2-Preis kann als Treiber für den schnelleren Einsatz von alternativen Technologien fungieren. Es muss dabei jedoch auf die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie geachtet und ein wirksamer Carbon-Leakage-Schutz sichergestellt werden.

Neue Verfahren wegen langer Innovations- und Investitionszyklen bereits jetzt entwickeln

Um die Verfügbarkeit der Technologien zu gewährleisten, müssen frühzeitig Forschung und Entwicklung forciert werden. Die dena-Leitstudie zeigt, dass viele alternative Technologien wie der Einsatz von Wasserstoff anstatt von Kohle bei der Stahlherstellung erst ab 2040 umfangreich zum Einsatz kommen. Dies ist den sehr langen Investitions- und Innovationszyklen von Industrieprozessen geschuldet, die in der Stahl- und Chemieindustrie bis zu 30 Jahre betragen können – 15 Jahre für die Entwicklung, 15 Jahre für die Marktverbreitung. Es müssen daher Instrumente entwickelt werden, die eine rechtzeitige Technologieentwicklung und Markteinführung über Jahrzehnte hinweg sicherstellen und gleichzeitig die Planungssicherheit für die Unternehmen garantieren.

[37] dena (2017), Gebäudestudie; Der Begriff bezeichnet die Verlagerung von Produktionskapazitäten in Länder, in denen Produkte wegen geringerer Klimaschutzanforderungen mit niedrigeren Kosten, aber höheren CO_2-Emissionen produziert werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht soll die damit einhergehende Verringerung der inländischen Wirtschaftsleistung vermieden werden, aus klimapolitischer Sicht der damit verbundene Anstieg der Gesamtemissionen.

Zeitgleich soll die Industrie eng in die Integrierte Energiewende eingebunden werden – zum Beispiel durch flexible Nutzung von Strom statt einer Optimierung auf Bandlasten oder der Einspeisung von Abwärme in ein Fernwärmenetz.

Wertschöpfungsnetzwerke stehen vor Strukturwandel

Die Energiewende führt bis 2050 zu einer deutlichen strukturellen Veränderung insbesondere bei stark integrierten Wertschöpfungsprozessen in der Industrie. Die geringere Verarbeitung von fossilen Energieträgern beeinträchtigt beispielsweise die Verfügbarkeit von bestimmten Grundstoffen, da Raffinerien typischerweise ein breites Produktspektrum aus Kraft- und Brennstoffen sowie Grundstoffen herstellen. Bei verstärkter Nutzung von Strom anstelle von Öl und Gas als Energieträger im Jahr 2050 muss die Versorgung der Chemieindustrie mit Naphtha als wichtigem Grundstoff auf anderem Wege sichergestellt werden. Dies kann durch Importe oder durch Investitionen in auf die Naphthagewinnung spezialisierte Raffinerien in Deutschland erfolgen. In den untersuchten Szenarien sind selbst für den 95-Prozent-Pfad noch Rohölimporte von rund 100 bis 120 TWh/a vorgesehen. Diese werden ausschließlich für die stoffliche Nutzung in der Industrie verwendet, überwiegend für die chemische Industrie. Alternative Versorgungswege und Herstellungsprozesse synthetischer Grundstoffe sind denkbar, würden aber den Bedarf an erneuerbarem Strom für die Elektrolyse weiter erhöhen. Zudem müsste die Frage beantwortet werden, wie andere wichtige Raffinerieprodukte für den nichtenergetischen Verbrauch wie Bitumen, Schmierstoffe oder Petrolkoks etwa für die Aluminiumerzeugung oder die Bauindustrie bereitgestellt werden können. Dieser strukturelle Wandel ist bei der weiteren Gestaltung der Energiewende und auch bei der Technologieentwicklung mit zu berücksichtigen.

Wasserstoffanwendungen gewinnen an Bedeutung

Anwendungsfälle für Wasserstoff gewinnen in der Industrie sukzessive an Bedeutung, insbesondere in der Stahl- und Chemieindustrie. So beträgt der Anteil von Wasserstoff in Reinform oder als Beimischung zu synthetischem Methan am Energiebedarf in 2050 in der Stahlindustrie bis zu 20 Prozent, in der Chemieindustrie 8,5 Prozent und in der Branche „Stein und Erden“ 28 Prozent. Mit Blick auf die begrenzte Transportfähigkeit wird Wasserstoff in Deutschland regional hergestellt werden. Die hierzu benötigte Wasserstoffinfrastruktur lässt sich zum großen Teil durch Umrüstung von bestehender Erdgasinfrastruktur bereitstellen. In den nächsten Dekaden sind in der Erdgasinfrastruktur regelmäßig Ersatzinvestitionen notwendig, in deren Zuge der Aufbau regionaler und überregionaler Wasserstoffinfrastrukturen geprüft werden sollte.

Handlungsempfehlungen

- **Forschung und Entwicklung forcieren:** Bund und Länder sollten bei der Ausrichtung der Forschungsförderprogramme darauf achten, dass Erforschung und Entwicklung der langfristig erforderlichen klimaschonenden Technologien bereits jetzt ausreichend möglich ist und Anreize für den schrittweisen Einsatz in den Unternehmen sicherstellen. Die Politik muss schnellstmöglich stabile Rahmenbedingungen schaffen und Schwerpunkte setzen, um die Bereitschaft der Industrie für Investitionen in neue Verfahren zu erhöhen und diese langfristig kalkulierbarer zu machen (Planungssicherheit).

- **Umgang mit verbleibenden CO_2-Mengen klären:** Es bedarf mittelfristig einer erneuten politischen Diskussion und Einordnung von CCS, gerade bei einer Entscheidung zur Verfolgung des 95-Prozent-Ziels.

- **Wasserstoffanwendungen einführen:** Die Industrie bietet einen guten Einstiegsmarkt für Wasserstoffanwendungen. Bund und Länder sollten weitere Pilotprojekte zur Wasserstoffnutzung in der Industrie anstoßen und fördern. Die Umsetzung sollte – im Sinn einer integrierten Energiewende – erneuerbare Energien, Infrastrukturen und Industriekunden ganzheitlich betrachten.

- **Folgen der Energiewende für die Industrie untersuchen:** Die Bundesregierung sollte kurzfristig Folgestudien zu den genauen strukturellen Auswirkungen der Energiewende auf die Industrie und die verfügbaren Grundstoffe in den verschiedenen Branchen anstoßen, um Chancen und Risiken rechtzeitig und angemessen adressieren zu können.

- **Unternehmensnetzwerke ausbauen:** Die Bundesregierung und die deutsche Wirtschaft sollten ihr erfolgreiches Instrument der freiwilligen Energieeffizienz-Netzwerke für weitere Energiewendethemen öffnen und ausbauen. Bereits über 1.600 Unternehmen beteiligen sich an diesem mehrjährig angelegten, systematischen und zielorientierten Erfahrungsaustausch und steigern ihre Energieeffizienz dadurch doppelt so schnell wie der Durchschnitt (Stand: April 2018).

Diskurs: Carbon Capture and Storage (CCS)

Eine weitere Frage, die in den vergangenen Jahren intensiv und kontrovers diskutiert wurde, ist der Einsatz von Verfahren zur CO_2-Abscheidung und -Speicherung (Carbon [Dioxide] Capture and Storage, CCS). CCS meint die Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) in Kraftwerken oder Industrieanlagen und dessen nachfolgende dauerhafte Einlagerung in tiefen geologischen Schichten an Land oder im Meeresuntergrund zur Vermeidung klimawirksamer Emissionen.

Die technische Realisierbarkeit der CO_2-Abscheidung steht grundsätzlich außer Zweifel. Das Verfahren wird bereits seit Jahren in einigen Industrieprozessen großtechnisch verwendet, beispielsweise bei der Ammoniakherstellung. Allerdings gibt es **in der breiten Bevölkerung Vorbehalte gegenüber der Technologie**, insbesondere gegenüber der Speicherung. Selbst wenn im Normalbetrieb keine negativen Auswirkungen für die menschliche Gesundheit zu erwarten wären, könnten sich – so die Sorge – Gesundheitsrisiken infolge von Unfällen oder durch eine allmähliche Freisetzung aus dem Speicher ergeben. Da CO_2 schwerer ist als Luft, könne sich im Umfeld einer großen Leckage eine CO_2-Schicht bilden, die unbemerkt den Sauerstoff verdrängen und für Menschen und Tiere zur Erstickung führen kann. Befürworter von CCS halten dieses Risiko durch fortlaufendes Monitoring von Transportleitungen und Lagerstätten für beherrschbar. Weitere Bedenken: In Leckagen werden Risiken für das Grundwasser und für den Boden gesehen. Frei gewordenes CO_2 könne Schadstoffe im Untergrund freisetzen sowie salzige Grundwässer aus tiefen Aquiferen verdrängen und dadurch zu Schäden (Versalzungen) im Grundwasser, in Böden und Oberflächengewässern führen.

Alle für CCS notwendigen **Schritte sind in Deutschland rechtlich geregelt**, die Abspaltung des CO_2 im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), der Transport und die Speicherung im Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) von 2012. Zudem unterliegen Anlagen zur Abscheidung, Pipelines zur Beförderung und Speicherstätten zur unterirdischen Speicherung von CO_2 den Monitoring-Anforderungen des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes. Danach ist ein zweistufiges Monitoring vorzusehen: Hierzu muss ein Speicher erstens permanent auf Leckagen geprüft werden. Tritt eine Leckage auf, muss zweitens mithilfe eines erweiterten Monitorings die entwichene CO_2-Menge ermittelt werden. Derzeit ist jedoch für CO_2-Transport- oder Speicherkapazitäten ein **weiterer Zubau in Deutschland rechtlich nicht möglich**, da § 2 Abs. 2 KSpG regelt, dass ein Antrag für CO_2-Speicher bis Ende 2016 hätte gestellt werden müssen. Zudem haben die Bundesländer mit der Länderklausel umfangreiche Kompetenzen zur Entscheidung über die Demonstration der CCS-Technologie auf ihrem Landesgebiet und etliche Bundesländer haben dies genutzt, um eine CO_2-Speicherung durch Landesgesetze zu verbieten oder stark einzuschränken.

In den in jüngster Zeit veröffentlichten **Studien zur Erreichung der Klimaziele 2050** wird häufig die Aussage getroffen, die Erreichung des 95-Prozent-Ziels sei ohne CCS nicht möglich. So wird CCS beispielsweise in den vom Bundeswirtschaftsministerium beauftragten „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ ebenso einbezogen (in 2050 rund 35 Millionen t CO_2 in sechs emissionsintensiven Industrieprozessen[38]) wie in der vom Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. beauftragten Studie „Klimapfade für Deutschland“ (in 2050 rund 73 Millionen t CO_2 für prozess- und energiebedingte Emissionen der Stahl-, Ammoniak- und Zementherstellung sowie weitere 20 Millionen t CO_2 im Energie-/Umwandlungssektor[39]).

[38] Fraunhofer ISI et al. (2017), Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario, Kapitel 2.4 (S. 44).
[39] BCG/prognos (2018), Klimapfade für Deutschland, Kapitel 5.1.4 (S. 153).

CCS ermöglicht keine 100-prozentige Treibhausgasminderung der behandelten Prozesse. Ziel ist meist die Abscheidung von mehr als 90 Prozent der Emissionen: In der Realität werden laut Umweltbundesamt oft nur rund 60 bis 80 Prozent erreicht. In den Langfristszenarien des Bundeswirtschaftsministeriums werden in der Betrachtung bestimmter Branchen Abscheideraten von im Mittel etwa 60 Prozent genannt (beispielsweise Stahl: 36 Prozent, Chemieprozesse: 95 Prozent). Dabei ist der Einsatz von **CCS mit erheblichem Energieverbrauch verbunden**. „Abhängig vom jeweiligen Prozess und gewählten CCS-Verfahren liegt der spezifische Energiebedarf bei etwa 1 MWh je Tonne abgeschiedenes CO_2."[40] Dies reduziert die Wirtschaftlichkeit der Primärprozesse, bei denen CCS eingesetzt wird.

Im Rahmen der dena-Leitstudie wurde das Thema intensiv im Partnerkreis diskutiert. Für Phase 1 der Bearbeitung wurde dabei einstimmig die Berücksichtigung von CCS als CO_2-Vermeidungsoption ausgeschlossen. Die in Phase 1 erarbeiteten Transformationspfade haben zwar das 80-Prozent-Ziel erreicht, das 95-Prozent-Ziel jedoch aufgrund verbleibender Prozessemissionen aus dem Industriesektor um rund vier Prozentpunkte verfehlt. Hier ist anzumerken, dass bereits umfangreiche Prozesse auf klimafreundliche, strom- oder wasserstoffbasierte innovative Produktionsverfahren umgestellt wurden. Für Phase 2 wurden in enger Diskussion mit den Studienpartnern sowie mit den Gutachtern die in den einzelnen emissionsintensiven Industriebranchen angenommenen Transformationspfade einzeln überprüft und – wo möglich – absehbare technische Innovationen zur CO_2-Vermeidung eingeführt. Zusätzlich wurde **CCS zur Erreichung des 95-Prozent-Ziels** zugelassen, um die verbleibenden Restemissionen bis 95 Prozent beseitigen zu können. Für das Jahr 2050 werden somit die Restemissionen des Industriesektors von 42 Millionen t CO_2 nach Einsatz aller Energieeffizienz- und Klimaschutzmaßnahmen zusätzlich **durch CCS um 16 Millionen t CO_2 reduziert** – auf insgesamt verbleibende 27 Millionen t CO_2.

In Relation zu den gesamten Treibhausgasemissionen in 2050 ist der durch CCS geleistete Beitrag zur Klimazielerreichung erheblich: Die Restemissionen des Industriesektors werden in 2050 durch CCS um 38 Prozent von 42 auf 27 Millionen t CO_2 gesenkt. Diese Reduktion macht ein Viertel des im Jahr 2050 insgesamt für Deutschland verbleibenden Treibhausgasbudgets von 62,4 Millionen t CO_2 aus.

Die CO_2-Mengen lassen sich aber auch in eine andere Relation setzen: Die in der dena-Leitstudie durch CCS auszugleichenden Treibhausgasemissionen in Höhe von 16 Millionen t CO_2 entsprechen **1,2 Prozent der 1.248 Millionen t CO_2 im Basisjahr 1990**. Es ist also durchaus vorstellbar, dass rechtzeitig bis 2050 Technologien verfügbar sind, die für die verbleibenden CO_2-intensiven Prozesse wirtschaftlich tragfähige klimafreundliche Verfahrensalternativen oder Materialien anbieten, die CCS überflüssig machen.

[40] Fraunhofer ISI et al. (2017), Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland, Modul 3: Referenzszenario und Basisszenario, Kapitel 2.4 (S. 44).

2.11 Wie muss die Entwicklung in Deutschland in die internationale Energiewende eingebettet werden?

Deutschland trägt mit seinen Klimazielen bis 2050 seinen Teil dazu bei, die Ziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen. Gleichzeitig reichen die deutschen Treibhausgasminderungen alleine bei Weitem nicht aus, um den Klimawandel aufzuhalten. Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, dass die deutschen Ambitionen im Rahmen europäischer und globaler Anstrengungen gedacht werden und Deutschland notwendige Abstimmungen auf europäischer und internationaler Ebene aktiv mitgestaltet. Auf diese Weise entstehen Exportchancen für deutsche Unternehmen und zukunftsfähige Arbeitsplätze können gesichert werden.

Energiewende braucht Import erneuerbarer Energie und europäischen Binnenmarkt

Die Annahmen der untersuchten Transformationspfade führen zu dem Ergebnis, dass Deutschland auch bei einer erfolgreichen Umsetzung der Energiewende weiterhin auf Energieimporte angewiesen sein wird, wenn auch in Summe in geringerem Maße als bisher. Die Abhängigkeitsrate sinkt in allen zielerreichenden Szenarien von heute fast 90 Prozent auf unter 50 Prozent.[41]

Alle Szenarien zeigen dabei einen intensiven Stromaustausch mit den europäischen Nachbarstaaten (bis zu 136 TWh/a Nettostromimporte in 2050[42]), um Ausgleichseffekte bei der Last, der Erzeugung erneuerbarer Energie und der Bereitstellung gesicherter Leistung nutzen zu können. Außerdem besteht aus heutiger Sicht ein deutlicher Importbedarf an synthetischen Brenn- und Kraftstoffen (bis zu 744 TWh/a in 2050[43]) aus dem europäischen und außereuropäischen Ausland, während der Import fossiler Energieträger zur energetischen Nutzung nahezu komplett zurückgeht.

Eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende in Deutschland muss daher eng mit der Klima- und Energiepolitik der europäischen Mitgliedstaaten abgeglichen werden, um zum Beispiel realistisch beurteilen zu können, in welchem Umfang Import- und Ausgleichsmöglichkeiten für Strom zur Verfügung stehen. Dieser Abgleich ist auch mit Blick auf die globale Entwicklung von Angebot und Nachfrage von synthetischen Brenn- und Kraftstoffen notwendig.

[41] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 234.
[42] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 213.
[43] ewi-Gutachterbericht (2018), S. 242.

Verfügbarkeit von Technologien und Wirtschaftlichkeit sichern

Die Realisierung der Energiewende ist in allen Sektoren auf die Nutzung verschiedenster, teils noch junger Technologien angewiesen. Deren Verfügbarkeit und Preisentwicklung sowie weiter gehende Innovationen werden letztlich durch die weltweite Marktentwicklung bestimmt. Es gilt daher, den Verlauf und die Gestaltung der Energiewende weltweit zu verfolgen, um sich abzeichnende internationale Trends frühzeitig zu erfassen. Daraus können sich wichtige Implikationen für die Gestaltung der Energiewende in Deutschland ergeben. Gleichzeitig haben deutsche Unternehmen die Chance, diese Zukunftstechnologien zu entwickeln und weltweit zu vermarkten.

Deutschland muss auch in Zukunft als Wirtschaftsstandort für die Industrie attraktiv bleiben. Die Ergebnisse der dena-Leitstudie zeigen, dass die Umsetzung der Energiewende und eine starke industrielle Basis nicht im Widerspruch zueinander stehen müssen. Dieser Maxime sollte auch die Umsetzung der Energiewende in der Praxis folgen. Vor allem aufgrund der starken deutschen Industrie wird die Umsetzung der Energiewende international mit besonderem Interesse verfolgt. Diese erhöhte Aufmerksamkeit bietet die Chance, die Energiewende als Vorbild auszugestalten. Gleichzeitig hängt deren Wirtschaftlichkeit stark mit den internationalen Rahmenbedingungen zusammen. Es sollte deshalb sichergestellt werden, dass international und national möglichst gleiche Wettbewerbsbedingungen herrschen, um wirtschaftliche Nachteile für einzelne Unternehmen zu vermeiden. Sollte dies nicht möglich sein, müssen national wo notwendig entsprechende Maßnahmen zur Entlastung ergriffen werden.

Energiewende auf internationalen Rahmen abstimmen

Die Ausgestaltung von internationalen Vereinbarungen und die Festlegungen auf europäischer Ebene sowie die nationalen Gesetze haben einen großen Einfluss auf die Umsetzung der Energiewende in Deutschland und deren Integration in die internationalen Austausch- und Handelsbeziehungen. Deshalb sollten die Zielsetzungen und Instrumente auf den unterschiedlichen genannten Ebenen, aber auch für unterschiedliche Teilziele der Energiewende möglichst kompatibel ausgestaltet sein (zum Beispiel Ziele und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs versus solcher für die Emissionsreduzierung). Mit Blick auf die EU-Ebene und die rechtlichen Rahmenbedingungen wird deutlich, dass das Verfehlen von Zielen auch entsprechende Sanktionen nach sich ziehen kann. Das Erreichen der Klimaziele ist somit nicht nur eine Frage der Glaubwürdigkeit auf nationaler Ebene, sondern auch wesentlich für die gemeinsame Zielerreichung auf europäischer Ebene.

Handlungsempfehlungen

- **Internationale Vereinbarungen konkretisieren:** Die Bundesregierung sollte sich auf G20-Ebene für eine Umsetzung weiter gehender internationaler Vereinbarungen einsetzen, um einen Anschluss der nationalen Regime zur Reduzierung von CO_2-Emissionen zu erreichen. Damit kann sie Verzerrungen im globalen Handel reduzieren. Als Erstes könnte sie internationale Vereinbarungen für bestimmte emissionsintensive Branchen anstreben, um die deutsche Wirtschaft zu schützen und die Gesellschaft zu entlasten.

- **Fortschritte analysieren, Zielkonflikte erkennen:** Die Bundesregierung sollte die Zielsystematik und den Instrumentenmix über die verschiedenen handelnden und verantwortlichen Akteure und Politikfelder hinweg (Branchen, Länder, Bund, EU) überprüfen und vereinheitlichen. Zudem sollte sie eine übergeordnete Funktion zum fortlaufenden Monitoring und zum Abgleich bei Zielkonflikten für die Energiewende einrichten, zum Beispiel im Bundeskanzleramt.

- **Globale Trends beobachten:** Bundesregierung und Wirtschaft sollten globale, energiewenderelevante Trends stärker beobachten, um Kostenentwicklungen zu erfassen und Zukunftstechnologien auf dem Weltmarkt positionieren zu können.

- **Nachteile für deutsche Wirtschaft verhindern:** Die Bundesregierung sollte den Carbon-Leakage-Schutz weiter stärken. Dafür gilt es, die geplante Revision des EU-Beihilferechts zu nutzen, um für die deutsche Wirtschaft ausreichend Handlungsspielraum auf nationaler Ebene sicherzustellen und sie vor Nachteilen im globalen Handel durch die Energiewende ausreichend schützen zu können.

3. Struktur und Partnerkreis der dena-Leitstudie Integrierte Energiewende

Die Zielsetzung der deutschen Energie- und Klimapolitik ist bekannt: 2050 sollen die Emissionen von Treibhausgasen gegenüber 1990 um 80 bis 95 Prozent sinken. Hinzu kommen die Beschlüsse der Pariser Klimakonferenz, nach denen die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad, besser auf 1,5 Grad begrenzt werden soll.

Die dena hat deshalb im Februar 2017 mit über 60 Partnern aus verschiedenen Branchen die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende initiiert. Ziel der Leitstudie war es, Lösungen und Rahmenbedingungen für ein optimiertes, nachhaltiges Energiesystem bis 2050 zu identifizieren und realistische Gestaltungsmöglichkeiten in vier Sektoren mit zahlreichen Unterbranchen zu analysieren. Die dena hat das Projekt initiiert und geleitet. Sie war verantwortlich für die Konzeption und Umsetzung des Arbeitsprogramms sowie für die Kommunikation.

Inhaltliche Struktur

Die dena-Leitstudie Integrierte Energiewende ist in die vier Studienmodule „Energieerzeugung und -verteilung“, „Gebäude“, „Industrie“ und „Mobilität“ aufgeteilt. In den drei Modulen Gebäude, Industrie und Mobilität wurden jeweils aus Sicht der Endenergieverbrauchssektoren die möglichst realistische Entwicklung von Technologien, Prozessen und Materialien sowie die daraus resultierenden Energiebedarfe diskutiert. Ebenso wurden hier auch die Potenziale der Sektoren zur Teilhabe am Energiesystem durch verbrauchsseitige Energieerzeugung, -umwandlung oder -speicherung sowie durch Flexibilitätspotenziale erörtert. Im Studienmodul Energie wurde dann die Deckung der Endenergiebedarfe der Verbrauchssektoren diskutiert – sektorübergreifend unter Berücksichtigung der kurz- und langfristigen Bereitstellungskosten aller Energieträger im europäischen Gesamtsystem unter Beachtung der wechselseitigen Interdependenzen und gegebener politischer, regulatorischer und technologischer Rahmenbedingungen. In diesem Studienmodul wurde auch die weitere Entwicklung der hierfür notwendigen Energieinfrastrukturen, also die Strom-, Gas- und Wärmenetze, sowie die Infrastrukturen für flüssige Energieträger betrachtet.

Für die Modellierung wurden vier Zielszenarien und ein Referenzszenario definiert. Das Referenzszenario beschreibt eine bereits ambitionierte technologische Entwicklung bis 2050 und entspricht auf politischer Ebene einer Fortschreibung der aktuellen Energiepolitik in Deutschland. Die Zielszenarien beschreiben mögliche Pfade für eine Transformation des Energiesystems, mit denen die politischen Minderungsziele der Treibhausemissionen um 80 oder 95 Prozent bis 2050 im Vergleich zu 1990 sektorübergreifend erreicht werden können.

Auf Basis der Szenarien und der festgelegten Transformationspfade hat der Hauptgutachter der dena-Leitstudie, die ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, gemeinsam mit weiteren Fachgutachtern die erforderlichen Energiemengen, die Stromnetz- und Stromerzeugungsinfrastruktur sowie Kostenverteilungen berechnet. Sowohl das Referenzszenario als auch das Elektrifizierungs- und Technologiemixszenario sind gegenüber einer Fortschreibung des heutigen Energiesystems mit Mehrkosten verbunden. Die gesellschaftliche Verteilung dieser Kosten wurde nicht untersucht.

Die dena-Leitstudie wurde in zwei Phasen erstellt. Im Oktober 2017 wurde ein Zwischenfazit veröffentlicht. Dieses beinhaltete vorläufige Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Dialogprozessen mit verschiedenen Stakeholdern. In dieser ersten Phase wurde pro Szenario jeweils ein Transformationspfad entwickelt und auf die Zielerreichung des 80-Prozent- beziehungsweise des 95-Prozent-Ziels modelliert.

Für die Phase 2 wurden aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen und den breiten Diskussionen nach Veröffentlichung des Zwischenfazits die Szenarien und Transformationspfade weiter verfeinert sowie die Durchführung von zusätzlichen Detailauswertungen und Sensitivitätsanalysen beschlossen, um wichtige Einzelfragen zu beantworten. Dazu gehörte beispielsweise die Untersuchung der Auswirkungen einer knapperen oder teureren Verfügbarkeit von Power-to-X-Energieträgern und deren Effekte auf den Energieträgermix und die Gesamtsystemkosten. Weitere Fragen betrafen unter anderem den netzdienlichen Einsatz von Flexibilitäten und deren Rückwirkungen auf die Stromnetze, den Einfluss des Einsatzes von Oberleitungshybrid-Lkw auf das Energiesystem und den Einfluss der Verknappung von verfügbaren Flächen für Onshore-Wind verbunden mit der verstärkten Erdverkabelung von neuen Stromnetztrassen.

Organisatorische Struktur

Wissenschaftlicher Hauptgutachter der dena-Leitstudie war Dr. Harald Hecking/ewi Energy Research & Scenarios gGmbH, ergänzt um die Fachgutachter Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz/ef.Ruhr GmbH, Prof. Dr.-Ing. Bert Oschatz/ITG Dresden, Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm/FIW München, Prof. Dr. Peter Radgen und Dr. Frank May.

Innerhalb des Projekts haben die Studienpartner im Lenkungskreis über die grundsätzliche Ausrichtung der Studie und zu modulübergreifenden Fragestellungen beraten und entschieden. In den Modulsteuerkreisen diskutierten die beteiligten Partner spezifische Transformationspfade und Parameter der Studienmodule. Ein Beirat renommierter Akteure aus Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft stand der dena beratend zur Seite. Ergänzend wurden öffentliche Dialogveranstaltungen durchgeführt, um Fragestellungen und Erkenntnisse über den Partnerkreis hinaus mit einem breiten Stakeholder-Kreis zu diskutieren.

Auf Basis der Szenarien wurden in engem Austausch mit den beteiligten Partnern sowie mit den Gutachtern übergeordnete Studienannahmen (zum Beispiel Bevölkerungswachstum, Zinssätze) und Rahmenparameter (zum Beispiel Technologieentwicklung und -kosten, Energieträgerpreise) diskutiert und festgelegt sowie modulspezifische Transformationspfade für die Verbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Mobilität entwickelt, über die Sektoren hinweg abgestimmt und für die weiteren Berechnungen exogen vorgegeben.

Wir danken den Studien- und Modulpartnern der dena-Leitstudie:

Der Beirat besteht aus folgenden Personen:

- **Für die Wissenschaft:** Prof. Dr. Dirk-Uwe Sauer (Acatech ESYS, Vorsitzender des Beirats), Prof. Dr. Manfred Fischedick (Wuppertal Institut), Prof. Dr. Clemens Hoffmann (Fraunhofer IWES), Prof. Dr. Karsten Lemmer (DLR), Prof. Dr. Ortwin Renn (IASS Potsdam), Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner (TU München)

- **Für die Zivilgesellschaft:** Stefan Körzell (DGB), Holger Lösch (BDI), Klaus Müller (VZBV), Sabine Nallinger (Stiftung 2°), Michael Schäfer (WWF), Harriet Wirth (KfW), Dr. Christoph Wolff (European Climate Foundation)

- **Für die Politik:** Dr. Axel Bree (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Dr. Karl Eugen Huthmacher (Bundesministerium für Bildung und Forschung), Dr. Karsten Sach (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit), Dr. Volker Oschmann (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), Dr. Gerhard Schulz (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur), Norbert Conrad (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr Niedersachsen), Helmfried Meinel (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg), MdB Ralph Lenkert (Fraktion Die Linke), MdB Dr. Joachim Pfeiffer (CDU/CSU-Fraktion), MdB Dr. Julia Verlinden (Fraktion Bündnis 90/Die Grünen), MdB Bernd Westphal (SPD-Fraktion)

Impressum

Herausgeber:
Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)
Chausseestraße 128 a
10115 Berlin
Tel.: +49 (0)30 66 777-0
Fax: +49 (0)30 66 777-699
www.dena.de

Autoren:
Thomas Bründlinger
Julian Elizalde-König
Oliver Frank
Dietmar Gründig
Christoph Jugel
Patrizia Kraft
Oliver Krieger
Stefan Mischinger
Dr. Philipp Prein
Hannes Seidl
Stefan Siegemund
Christian Stolte
Mario Teichmann
Jakob Willke
Mareike Wolke

Bildnachweis:
Titelbilder – shutterstock, Getty Images/Thinkstock, Getty Images, iStockphoto/dan_prat, dena, S. 4 – dena/Christian Schlüter, S. 9 – Paul Langrock, S. 12/13 – shutterstock/elenabsl, S. 16 – shutterstock/Matej Kastelic, S. 19 – shutterstock/logoboom, S. 21 – shutterstock/rawf8, S. 23 – Paul Langrock, S. 25 – shutterstock/Kodda, S. 28 – shutterstock/Allexxandar, S. 32 – Paul Langrock, S. 34 – shutterstock/Michael Gancharuk, S. 39 – shutterstock/elxeneize, S. 42 – shutterstock/Differr, S. 46 – Paul Langrock

Konzeption & Gestaltung:
Heimrich & Hannot GmbH

Stand:
06/2018

Lesen Sie die komplette dena-Leitstudie inklusive des wissenschaftlichen Gutachterberichts unter: dena.de/leitstudie