

SCOPE.efzn

Szenarien, Optionen und Parameterräume für aktuelle energiepolitische Entscheidungsprozesse

Schlüsselerkenntnisse und Handlungsbedarfe aus der wissenschaftlichen Studie

DLR Institut für Vernetzte Energiesysteme
ISFH
Leibniz Universität Hannover
efzn

Das Projekt

In den letzten Jahren wurde eine beträchtliche Anzahl von Szenarien veröffentlicht, die beschreiben, wie sich die Energieversorgung in Deutschland entwickeln könnte, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Dabei werden unterschiedliche Energiesystemmodelle eingesetzt, die in Kombination mit divergierenden technologischen, politischen und sozioökonomischen Randannahmen eine große Bandbreite quantitativer Transformationspfade berechnen. Als Konsequenz kommen die Studien zum Teil zu abweichenden Schlussfolgerungen bzgl. Handlungsoptionen und -empfehlungen, was konsensfähige energie- und klimapolitische Entscheidungen erschwert.

Das Forschungsprojekt SCOPE.efzn hat Ergebnisse aktueller Szenariostudien in einer Meta-Analyse verglichen und Unsicherheiten bei der Rolle möglicher technisch-struktureller Strategien der Energiewende beleuchtet. Divergierende Annahmen und Aussagen der Energieszenarien wurden in einem transdisziplinären Gremium („Sounding Board“) mit Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft gespiegelt.

Dies bildete den Ausgangspunkt für eigene Energiesystem-Modellierungen, um die aus der aktuellen Szenarien-Landschaft ableitbaren Ergebnisse nachzuvollziehen, in die energiepolitische Diskussion einzuordnen und insbesondere bisher nicht berücksichtigte Faktoren, Aspekte und Sensitivitäten zu analysieren – mit dem Ziel, so zu neuen Erkenntnissen zu Handlungsbedarfen für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende zu gelangen.

Schlüsselerkenntnisse und Handlungsbedarfe

1

Ausbau-Dynamik erneuerbarer Stromerzeugung steigern

Für die Elektrifizierung von Raum- und Prozesswärme, Elektromobilität sowie die Nutzung von klimaneutral erzeugtem Wasserstoff und Wasserstoff-Derivaten wird erneuerbare Energie eingesetzt. Aus der Meta-Analyse ergibt sich entsprechend ein erheblicher Anstieg des jährlichen Brutto-Strombedarfs um mindestens 250 TWh bis 2035 und zwischen 300 und über 1000 TWh bis 2045, wenn Deutschland bis 2045 treibhausgasneutral werden soll.

Die Dynamik beim Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien muss deshalb ab sofort deutlich gesteigert werden, um die Klimaziele kostengünstig zu erreichen: Bei Windenergie auf See ist mit Neuinstallationen von kontinuierlich 3 bis 4 GW pro Jahr bis 2040 im Median aller Szenarien eine wesentlich höhere Ausbaudynamik als in der Vergangenheit notwendig. Für Windenergie an Land ist der erforderliche Ausbau mit ca. 9 GW bis mindestens 2035 pro Jahr in etwa doppelt so hoch wie der im Jahr 2025 erreichte Wert.

Bei der Photovoltaik muss die Dynamik der letzten Jahre beibehalten und ein Ausbau von etwa 20 GW pro Jahr erreicht werden.

2

Verzögerung vermeiden, Mehrkosten verhindern

Eine Verzögerung zentraler Transformationsprozesse führt in den SCOPE-Modellierungen zu deutlichen Mehrkosten im Energiesystem, wesentlich aufgrund höherer Kosten für Energieimporte. Einsparungen durch zeitlich verschobene Investitionen können die zusätzlichen Importkosten mittelfristig nicht kompensieren, da ein Großteil der Investitionen bis 2050 nachgeholt werden muss.

Wenn die Elektrifizierung der Endnutzungssektoren und der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung gemeinsam verzögert werden, entstehen bis 2050 zusätzliche Kosten in Höhe von 430 Mrd. Euro, was einem Anstieg der modellierten Gesamtsystemkosten von rund 12 % entspricht. Es ist also deutlich wirtschaftlicher, aktuelle Transformations-Hemmnisse zügig abzubauen, anstatt die Transformationsdynamik auf die Geschwindigkeit der langsamsten Elemente zu reduzieren.

3

Flexibilitäten und Speicher im Stromsystem bereitstellen

Für den zukünftigen Ausgleich von fluktuierender Stromerzeugung und variierendem Strombedarf ist der Ausbau von flexibler Kraftwerksleistung und Speichern unverzichtbar. Sowohl der Bedarf an Gas-/H_2-Kraftwerken als auch von Batterien hängt in den in der Meta-Analyse untersuchten Szenarien stark von modell-spezifischen Annahmen ab.

Für die installierten Leistungen flexibler Kraftwerke und Batterien ist für klimaneutrale Energiesysteme bis 2045 ein weiter Wertebereich zu finden, mit einem Median von jeweils ca. 80 GW. Dabei müssen die ersten Kraftwerke bereits bis 2035 auf grüne Gase umgestellt werden.

Die SCOPE-Modellierung zeigt: Langfristig gehen die Volllaststunden der Kraftwerke deutlich zurück und viele werden nur wenige hundert Stunden im Jahr benötigt. Speicher für Wasserstoff, Fernwärme und Strom ermöglichen den ganzjährigen effizienten Ausgleich von Stromerzeugung und Nachfragen an erneuerbarer Wärme und Kraftstoffen.

4

Heimische Erzeugung von grünem Wasserstoff ausbauen

In zielerfüllenden Szenarien spielt Wasserstoff als (Langzeit-) Speicher und zur Nutzung von Spitzen der erneuerbaren Stromerzeugung eine wichtige Rolle. Auch in der Industrie wird es einen nennenswerten energetischen und stofflichen Bedarf geben, während in den untersuchten Szenarien im Verkehr und im Gebäudesektor ein geringer oder gar kein Einsatz erwartet wird.

Bis 2045 sind in Deutschland dabei Elektrolyseure zwischen 26 und 121 GW_{el} Leistung erbaut. In der SCOPE-eigenen Modellierung kann der Bedarf an Wasserstoff zu 90 % aus heimischer Produktion gedeckt werden, wenn ein Zubau erneuerbarer Stromerzeugungs-Kapazitäten von 20 % über den EEG-Zielen erfolgt. Dies setzt voraus, dass ein systemdienlicher Elektrolyseursbetrieb mit Volllaststunden, die im Modell je nach Standort auch unter 2000 Stunden betragen können, auch betriebswirtschaftlich zu realisieren ist.

Produktion von „blauem“ Wasserstoff und Wasserstoff aus Biomasse spielt national in den betrachteten Szenarien höchstens als Übergangstechnologie eine Rolle, während Importe grüner Energieträger in allen analysierten Szenarien die heimische Produktion ergänzen.

Wärmeversorgung konsequent auf Erneuerbare Energien umstellen

Es besteht Einigkeit in den analysierten Studien darüber, dass die Gebäudewärmeversorgung in Deutschland bis 2045 weitgehend auf den Energieträger Strom umgestellt werden soll.

Elektrische Wärmepumpen in Gebäuden haben dabei den größten Anteil. Sie ermöglichen den Einsatz von erneuerbarem Strom im Wärmesektor und senken durch ihre Effizienz den Primärenergiebedarf des Gesamtsystems deutlich. Wärmenetze bieten weitere Vorteile wie zusätzliche Flexibilitäten im Rahmen der Stromnetzdienlichkeit beim Einsatz elektrischer Großwärmepumpen. Sie stellen die zweitwichtigste Versorgungsform dar. Daher sind stabile, wirksame Rahmenbedingungen zu schaffen, mit denen die erforderliche hohe Umrüstungsquote von Gebäudeheizungen und der Wärmenetzausbau tatsächlich realisiert werden.

Der Einsatz der molekülbasierten Energieträger Wasserstoff, Biogas bzw. Bio-Methan und synthetisches Erdgas für die Gebäudewärme führt in der SCOPE-Modellierung zu deutlichen Mehrkosten und ist 2045 bei den meisten Netto-Null-Szenarien der Meta-Analyse eher klein oder gar nicht vorhanden.

6

Importabhängigkeit vermeiden, Lieferketten diversifizieren

Importe synthetischer Energieträger wie Wasserstoff, SNG und PtL-Produkte entsprechen in den in der Meta-Analyse untersuchten Szenarien im Jahr 2045 energetisch im Mittel 15 % des Primärenergiebedarfs. Wasserstoff-Importe liegen dabei energetisch im Schnitt bei ca. einem Viertel heutiger Erdgas-Importe, wobei die Bandbreite innerhalb der Szenarien insgesamt groß ist.

Auch im modellierten SCOPE-Basis-Szenario bestehen 2045 17 % des Primärenergiebedarfs aus Importen synthetischer Energieträger. Angesichts der zu erwartenden deutlich höheren Importpreise synthetischer Energieträger gegenüber ihren heutigen fossilen Pendants werden die Kosten für den Import nicht proportional zu den importierten Energiemengen sinken, sondern deutlich langsamer.

Insofern wird Deutschland auch langfristig ökonomisch von Energieimporten abhängig bleiben. Angesichts dieser Tatsache sollten zukünftige Importstrategien für grüne Energieträger auf sichere bzw. resiliente Transportrouten und Infrastrukturen ausgerichtet sein sowie ein breites Portfolio politisch stabiler Herkunftsländer umfassen.

CCS: Übergangstechnologie für schwer vermeidbare Restemissionen

Die betrachteten Szenariostudien sehen die Rolle von CCS (CO_2-Abscheidung und -Speicherung) für das Ziel der Klimaneutralität in 2045 primär in der Kompensation „schwer vermeidbarer Restemissionen“, vor allem aus den Sektoren Landwirtschaft und Industrie. CCS kann aufgrund begrenzter heimischer CO_2-Speicherpotenziale langfristig gesehen nur eine Übergangsrolle einnehmen.

In der SCOPE-Modellierung kann CCS bis 2050 zur Reduktion der Systemkosten beitragen, wenn es den Dekarbonisierungsbeitrag der teuersten synthetischen Energieträger wie PtL teilweise substituiert. Importe und die Produktion von grünem Wasserstoff werden dabei teilweise durch fossile Energieträger ersetzt, deren Emissionen durch DACCS (CO_2-Gewinnung aus der Luft) kompensiert werden.

Die Entwicklung von natürlichen THG-Quellen und -Senken aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft und von Speicherpotenzialen für CO_2 sollte fortlaufend im Blick behalten werden, da diese den notwendigen und möglichen Umfang der technischen CO_2-Einlagerung für das Netto-Null-Ziel 2045 maßgeblich mitbestimmen.

8

Systemkosten ganzheitlich betrachten

Die SCOPE-Modellierung zeigt, dass die Transformation des Energiesystems die Kostenstruktur und Investitionsbedarfe gegenüber heute grundlegend verändert. Die hohen Ausgaben für Energieimporte sinken deutlich, während Investitionskosten und Ausgaben für Betrieb und Wartung stark an Bedeutung gewinnen.

Die jährlichen Investitionen – insbesondere in erneuerbare Energien sowie in Flexibilitätsoptionen wie Speicher, Elektrolyseure und Kraftwerke – verdreifachen sich zwischen 2025 und 2035 von 20 auf 65 Mrd. € pro Jahr, entsprechend nimmt auch die Bedeutung der Finanzierungskosten zu.

Stabile politische Rahmenbedingungen können das Risiko senken und Investitionen erleichtern. Die jährlichen Investitionsbedarfe liegen auch in der Spitze immer unter den heutigen jährlichen Ausgaben für den Import von fossilen Energieträgern. In der Transformationsphase fallen hohe Investitionen und weiterhin relevante Importausgaben jedoch gleichzeitig an, was temporär zu erhöhten Gesamtausgaben führt.

Europäische Zusammenarbeit stärken

Grenzüberschreitende Zusammenarbeit kann die Energiewende in Europa kostengünstiger und robuster gestalten. Die SCOPE-Modellierung zeigt: Ein ambitionierter Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland bleibt unverzichtbar. Im europäischen Kontext können die Kosten möglicher Verzögerungen beim deutschen EE-Ausbau jedoch teilweise abgefedert werden, wenn Nachbarländer zusätzliche Dynamik entwickeln und passende Transportinfrastrukturen rechtzeitig gemeinsam geplant und realisiert werden.

Das untersuchte Beispiel zusätzlicher Interkonnektoren zwischen Deutschland und dem Vereinigten Königreich verdeutlicht den Nutzen solch grenzüberschreitender Netzinfrastrukturen. Im Sommer können deutsche Solarstromüberschüsse auf die britischen Inseln fließen, im Winter britischer Windstrom nach Deutschland. So lassen sich in beiden Ländern Einsparungen in Milliardenhöhe erzielen, insbesondere weil Importe aus Drittstaaten reduziert werden können. Europäische Projekte für grenzüberschreitende Infrastruktur sollten deshalb gestärkt und in schnellere gemeinsame Planungs- und Genehmigungsverfahren überführt werden.

Beteiligte Forschungspartner



Das **Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn)** ist ein gemeinsames wissenschaftliches Zentrum der Universitäten Braunschweig, Clausthal, Göttingen, Hannover und Oldenburg, das die Energieforschungskompetenzen der Universitätsstandorte aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften sowie Rechts-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften bündelt und Akteure der Transformation des Energiesystems aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft zusammenführt.



Das **DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme (DLR-VE)** entwickelt Transformationsstrategien und technische Lösungen, um die Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie effizient und systemdienlich miteinander zu koppeln und erarbeitet dafür gemeinsam mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung ein ganzheitliches Systemverständnis und wirksame Systemlösungen auf allen Ebenen des Energiesystems. Die Zusammenarbeit der technischen und systemanalytischen Forschungsgruppen schaffen dabei wertvolle Synergieeffekte.

Das **Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH)** ist eine Forschungseinrichtung des Landes Niedersachsen und ein An-Institut der Leibniz Universität Hannover. Mit 160 Mitarbeiter:innen forscht das ISFH an der Nutzung der Solarenergie, der Integration der Erneuerbaren Energien in unser Energiesystem und der regenerativen Energieversorgung von Gebäuden und Quartieren.

Leibniz Universität Hannover

Am **Institut für Festkörperphysik an der Leibniz Universität Hannover** werden mit dem Werkzeug der Energiesystemanalyse Forschungsfragen zur Rolle der Erneuerbaren Energien im zukünftigen Energiesystem untersucht. Im Fokus stehen die Entwicklung und Analyse von Transformationspfaden für das Energiesystem und der Einfluss von neuer Technologie auf diese Pfade.

Die in dieser Broschüre aufgeführten Schlüsselerkenntnisse und Handlungsbedarfe wurden im Rahmen der Studie „SCOPE.efzn: Szenarien, Optionen und Parameterräume für aktuelle energiepolitische Entscheidungsprozesse“ ermittelt.

An der Studie, die standortübergreifend im **Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn)** durchgeführt wurde, waren Forschende des **Instituts für Festkörperphysik an der Leibniz Universität Hannover**, des **Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) – Institut für Vernetzte Energiesysteme Oldenburg/Stuttgart** und des **Instituts für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal (ISFH)** beteiligt.

Auftraggeber der Studie war das **Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz**, Förderer der Studie war das **Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur**.



Institut für Vernetzte Energiesysteme

ISFH

Leibniz Universität Hannover

efzn

SCOPE.efzn

Szenarien, Optionen und Parameterräume für aktuelle energiepolitische Entscheidungsprozesse

Abschlussbericht

Alexandra Reinhild Berndt[1,*], Alexander Mahner[2,*], Tobias Naegler[3,*], Leon Schomburg[2,4,*], Carsten Agert[3], Rolf Brendel[2,4], Kai Burhenne[2], Stefan Kronshage[3], Sebastian Lehnhoff[1], Raphael Niepelt[2,4], Thomas Pregger[3], Jonas Thomsen[2], Thomas Vogt[3]

*Hauptautor:innen in alphabetischer Reihenfolge
[1]Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (efzn), Goslar
[2]Leibniz Universität Hannover (LUH), Institut für Festkörperphysik, Hannover
[3]Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR),
Institut für Vernetzte Energiesysteme, Oldenburg/Stuttgart
[4]Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal (ISFH), Emmerthal

www.efzn.de/scope

Peter Herre/ Unsplash

Die vollständige Studie finden Sie unter:

www.efzn.de/scope

Auftraggeber:

Niedersächsisches Ministerium
für Umwelt, Energie und Klimaschutz

Förderer:

Niedersächsisches Ministerium
für Wissenschaft und Kultur