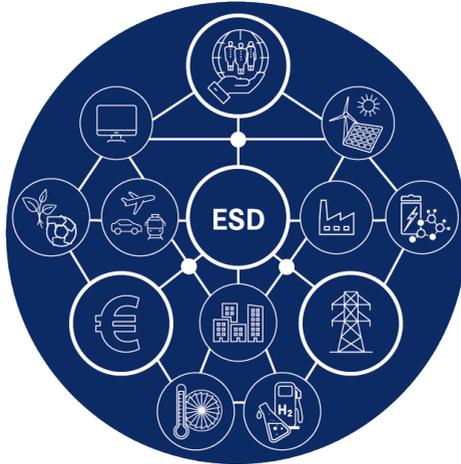




Energiesystemdesign-Policy Brief

# Die Energiewende integrativ denken





## Zusammenfassung

Die Erstellung und Analyse von Energieszenarien – eine essenzielle Methodik zur Unterstützung der erforderlichen nachhaltigen Transformation des Energiesystems – muss dem komplexen sozio-technischen Charakter dieses Systems gerecht werden. Es sind daher gleichermaßen technische, ökologische, ökonomische, institutionelle, organisatorische wie auch soziale Aspekte zu berücksichtigen.

Im Helmholtz Programm Energiesystemdesign (ESD) wurde von Forschenden des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), des Forschungszentrums Jülich (FZJ) und des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ein integrativer Szenarienansatz entwickelt, welcher diesen Anforderungen besser gerecht wird als dies in den meisten der bislang vorliegenden und die Diskussionen dominierenden Energieszenarien der Fall ist. Der Ansatz besteht im Kern aus zwei Elementen: 1) der Entwicklung von sogenannten sozio-technischen Energieszenarien und 2) der Abschätzung der Wirkungen dieser Energieszenarien hinsichtlich Nachhaltigkeitsindikatoren. Das Ziel ist die Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen für die nachhaltige Transformation des Energiesystems.

Die durchgeführten Analysen zeigen die Notwendigkeit, die möglichen unterschiedlichen Entwicklungen der Bevölkerung und der Wirtschaftsleistung, als zentrale Treiber der Energie- und Infrastrukturbedarfe, systematischer als bislang in Szenarienanalysen zu berücksichtigen. Unabhängig von der Bevölkerungsentwicklung oder der zukünftigen Wirtschaftsleistung sollte die Elektrifizierung von Produktions- und Transportprozessen im Zentrum geeigneter Transformationsstrategien stehen. Dies erfordert eine umfassende räumliche und zeitliche Flexibilität im Stromsektor. Die Elektrifizierung muss aus technischen Gründen durch die Nutzung von defossilisiert erzeugtem Wasserstoff ergänzt werden. Dieser würde aber zu drei Viertel importiert werden. Die Transformation des Wärmesektors verlangt dahingegen ein konzertiertes Zusammenspiel von energetischer Gebäudesanierung, Energieträgerwechsel und Ausbau der Strom- und Wärmenetze. Mit dem Umbau der Energiebereitstellung und -nutzung ist der Einsatz von kritischen Ressourcen verbunden. Zur Reduktion geopolitischer Risiken wie auch zum effizienten Einsatz dieser Ressourcen sind aber geeignete Strategien unumgänglich.

Die Transformation der Energiebereitstellung und -nutzung ist eine notwendige Bedingung, um einen klimaneutralen Energiesektor zu erhalten, aber keine hinreichende. Der Aufbau einer Infrastruktur für ein effektives CO<sub>2</sub>-Management ist unabdingbar, um unvermeidbare Treibhausgasemissionen zu kompensieren. Das Ziel eines nachhaltigen Energiesystems verlangt aber darüber hinaus die Berücksichtigung auch von nicht-klimarelevanten, umweltbezogenen Wirkungen. Bezieht man makroökonomische Effekte einer Transformation in die Entwicklung geeigneter Strategien mit ein, so zeigt sich, dass die untersuchten Transformationsstrategien zu einem Anstieg der inländischen Wertschöpfung führen,

### Autoren:

- Witold-Roger Poganietz, Jürgen Kopfmüller, Volker Stelzer (alle Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS))
- Patrick Jochem, Tobias Naegler (alle Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Vernetzte Energiesysteme)
- Felix Kullmann, Andrew Ross, Stefan Vögele (alle Forschungszentrum Jülich (FZJ), Institute of Climate and Energy Systems – Jülicher Systemanalyse (ICE-2))

### Hinweis:

Den Policy Brief kann man hier [☞](#) runterladen.

Zu dem Policy Brief existiert ein Anhang, in dem die vorgestellten Ergebnisse detailliert dargestellt werden.

Dieser Policy Brief wurde im Rahmen des Helmholtz-Programms Energiesystemdesign (ESD) erstellt.

aber gesamtwirtschaftlich zu keinem substantiell veränderten Arbeitskräftebedarf. Dahingegen sind zusätzliche Belastungen von Haushalten mit geringem Einkommen möglich. Dies hängt wesentlich von sozio-ökonomischen Randbedingungen ab, die eng mit energiebezogenen Größen verbunden sind. Schließlich wird der Grad der Internalisierung externer Kosten, als wichtige Gelingensbedingung für eine nachhaltige Transformation, wesentlich durch politische und wirtschaftliche Entwicklungen sowie durch die Innovationsfähigkeit des Systems beeinflusst.

## Einleitung

Energie ist von zentraler Bedeutung für das Funktionieren moderner Ökonomien und Gesellschaften. Aber ebenso können mit der Bereitstellung und Nutzung von Energie nennenswerte klima- und umweltbezogene Wirkungen verbunden sein. Daher kommt dem Energiesystem eine wesentliche Bedeutung für die erforderliche nachhaltige Transformation zu. Um die energie- und klimapolitischen Ziele zu erreichen, berührt der Umbau technischer Infrastrukturen immer auch die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Handlungsmöglichkeiten. Gleichzeitig ist die Gesellschaft wesentlicher Treiber der Transformation; sie kann ihr aber auch kritisch bis ablehnend gegenüberstehen.

Die Energiewende muss daher ganzheitlich, d.h. auch unter Einbeziehung von Interessen und Handlungsmöglichkeiten der gesellschaftlichen Gruppen konzipiert und umgesetzt werden. Bei der Diskussion um geeignete Maßnahmen schließt dies neben den technischen Herausforderungen auch gesellschaftliche, institutionelle und organisatorische Faktoren sowie nationale und internationale, politische und wirtschaftliche Entwicklungen mit ein. Diese Faktoren und ihre Wechselwirkungen müssen daher bei Entscheidungen im Rahmen der Energiesystemtransformation beachtet werden.

Energieszenarien leisten einen wichtigen Beitrag zur Unterstützung notwendiger Entscheidungen für die Transformation des Energiesystems. Um aber den Anspruch einer ganzheitlichen Betrachtung zukünftiger Energiesysteme zu erfüllen, ist es unerlässlich, zusätzlich zu den technischen und kostenseitigen Bedingungen der Energiesystemtransformation auch die gesellschaftlichen Voraussetzungen der Transformation sowie die Auswirkungen dieser auf Umwelt, Ökonomie und Gesellschaft zu analysieren. Aus diesem Grund haben sich das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des Helmholtz Programms Energiesystemdesign (ESD) zur Aufgabe gemacht, Energieszenarien zu entwickeln, die

diesem Anspruch nach Möglichkeit gerecht werden. Die Grundidee des entwickelten integrativen Szenarienansatzes besteht aus zwei Elementen: 1) die Erarbeitung von sogenannten sozio-technischen Szenarien durch Verbindung der möglichen Entwicklungen des gesellschaftlichen, politischen, ökonomischen und technischen Kontextes des Energiesystems mit der techno-ökonomischen Modellierung und 2) die Abschätzung der Wirkungen dieser Szenarien auf Nachhaltigkeitsindikatoren.

Die Verknüpfung unterschiedlicher Perspektiven auf die Energiesystemtransformation ermöglicht eine Bandbreite von Ergebnissen, wie sie für die Konzipierung und Umsetzung geeigneter energiepolitischer Maßnahmen essenziell ist. Jedoch werden solche Verknüpfungen bislang in den Diskussionen dominierenden Energieszenarien eher vernachlässigt. Nur eine solche breite Entscheidungsgrundlage erlaubt es, umsetzungsfähige Strategien für eine nachhaltige Transformation des sozio-technischen Energiesystems zu entwickeln.

Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse aus den im Rahmen des Helmholtz Programms ESD erarbeiteten Energieszenarien und den durchgeführten Wirkungsanalysen und -abschätzungen zusammengefasst.

# Sozio-technische Energieszenarien

Die betrachteten sozio-technischen Energieszenarien kombinieren Kontextszenarien mit techno-ökonomischen Energieszenarien. Kontextszenarien beschreiben mögliche Entwicklungen der gesellschaftlichen, politischen, ökonomischen und technischen Gegebenheiten des Energiesystems. Sie werden mit Hilfe des Cross-Impact-Balance Ansatzes ermittelt und bilden den Rahmen für die techno-ökonomischen Szenarien, die mittels eines kostenoptimierenden Energiesystemmodells erstellt wurden.

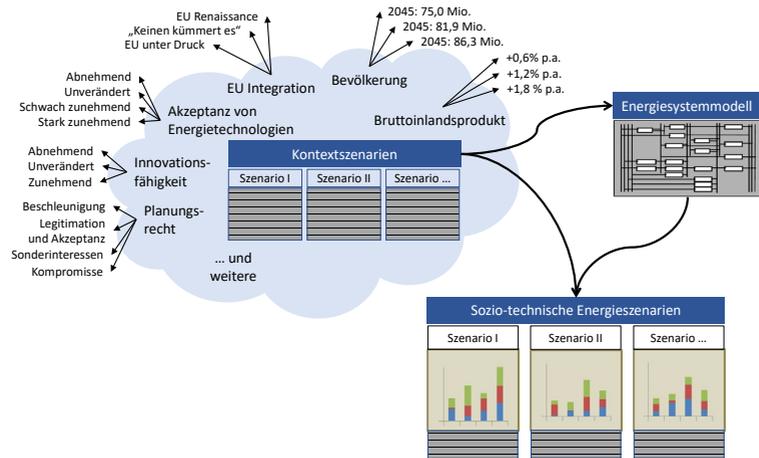


Abbildung 1: Sozio-technische Energieszenarien

Die entwickelten Energieszenarien unterstellen, dass bis 2045 in Deutschland ein klimaneutrales Energiesystem realisiert werden kann. Um eine Spannweite möglicher Entwicklungen von Gesamtwirtschaft und Demographie abbilden zu können, die einen unmittelbaren Einfluss auf die technische Ausgestaltung des Energiesystems haben, wurden unterschiedliche Entwicklungspfade bezüglich des Bruttoinlandsproduktes und der Bevölkerung angenommen. Für das Bruttoinlandsprodukt wurden Pfade zwischen einer als vorsichtig-pessimistischen (+0,6% p.a.) und einer als optimistisch eingeschätzten Entwicklung (+1,8% p.a.) untersucht. Die angenommene Bevölkerungsentwicklung variiert zwischen einer starken Schrumpfung auf 75,0 Mio. im Jahr 2045, gegenüber 84,7 Mio. im Jahr 2023, und einem moderaten Anstieg (86,3 Mio.).

Bei Beachtung der Rahmenbedingungen, wie sie durch die Kontextszenarien beschrieben werden, sind für die Szenarien mit einem geringen Wirtschaftswachstum und sinkender

Bevölkerung eine politische und ökonomische Fragmentierung der Weltordnung sowie ein stagnierender Zusammenhalt der EU kennzeichnend. Diese Entwicklungen, die die inländische Innovationsfähigkeit unter Druck setzen, werden durch inländische Faktoren verstärkt. Weiterhin ergibt sich in diesen Szenarien ein stagnierendes Einkommen für private Haushalte bei einer zunehmenden Ungleichheit der Einkommen und Vermögen. Trotz des eher unvorteilhaften ökonomischen Umfelds kann der Staat auf eine grundsätzliche Zustimmung der Bevölkerung zu einer Transformationspolitik zählen.

Demgegenüber ist das ökonomische und politische Umfeld in den Szenarien mit einem hohen Wirtschaftswachstum und einem Bevölkerungszuwachs durch eine tendenziell integrierte Weltordnung sowie einer zunehmenden Integration der EU charakterisiert. Dieses Umfeld begünstigt auch die inländische Innovationsfähigkeit sowie die Entwicklung der Einkommen der privaten Haushalte. Auch in diesen Szenarien erfährt der Staat eine grundsätzliche Zustimmung für eine Transformation des Energiesystems. Hierbei setzt der Staat sehr stark auf Partizipation und Legitimation.

# Anforderungen und Wirkungen von klimaneutralen Transformationspfaden

Die unsichere Entwicklung der Wirtschaftsleistung und der Bevölkerung sollte stärker in der Planung zukünftiger Energie- und Infrastrukturbedarfe berücksichtigt werden

Der zukünftige Energiebedarf Deutschlands und damit der notwendige infrastrukturelle Um- und Ausbau des Energiesystems wird maßgeblich durch die Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung in den nächsten Jahrzehnten bestimmt. Die vorliegenden Analysen zeigen, dass alleine aufgrund der unsicheren Entwicklung der Wirtschaftsleistung und der Bevölkerung im Jahr 2045 der Endenergiebedarf, der Strombedarf, die installierte Leistung zur Stromerzeugung und der Wasserstoffbedarf um 10 % bis 25 % variieren können. Eine vorzeitige Festlegung auf eine mögliche, i.d.R. moderate, Entwicklung der Wirtschaftsleistung und der Bevölkerung, birgt daher die Gefahr, zukünftige Energie- und Infrastrukturbedarfe zu unterschätzen, aber auch zu überschätzen.

Die räumliche und zeitliche Flexibilität im Stromsektor sind für eine Elektrifizierung des Gesamtsystems unabdingbar

Durch die zunehmende direkte und indirekte Elektrifizierung des Energiesystems steigt der Strombedarf bis 2045 kontinuierlich bis auf 1.100 bzw. 1.300 TWh jährlich - je nach Szenario - an. Zentrale Treiber sind „neue“ Verbraucher wie die Erzeugung synthetischer Energieträger (Elektrolyseure für Wasserstoff), Elektromobilität, Wärmepumpen und sonstige elektrische Wärmeerzeugung. Erzeugungsseitig werden onshore und offshore Windkraftanlagen sowie Dach- und Freiflächen-Fotovoltaikanlagen mit mehr als 90 % der erzeugten Strommenge das Rückgrat der deutschen Stromversorgung darstellen.

Die räumliche und zeitliche Disparität von Stromerzeugung und -bedarf erfordert einen weiteren Stromnetzausbau auf allen Netzebenen, einen Ausbau der Stromspeicherinfrastruktur sowie die

Technologie	Installierte Leistung in GW
Wind onshore	211-223
Wind offshore	53-70
Fotovoltaik Freiflächen	~255
Fotovoltaik Dachanlagen	115-180
Regelbare Kraftwerke (Wasserstoff, Biomasse und Biomethan)	145-160

Die regelbaren Kraftwerke dienen u.a. zur Spitzenlastabdeckung und als Backupkapazitäten im Falle längerer Dunkelflauten.

Tabelle 1: : Bandbreite der installierten Stromerzeugungsleistungen im Jahr 2045

Realisierung ökonomischer Flexibilitätspotenziale in Industrie, Gewerbe, Haushalten und im Umwandlungssektor (z.B. beim Betrieb von Elektrolyseuren). Die Einbindung Deutschlands in das europäische Verbundnetz bei Berücksichtigung der Transformation weiterer EU-Mitgliedstaaten ist ein wichtiger Baustein, um weiterhin ein hohes Niveau an Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Elektrifizierung und Wasserstoffnutzung sind entscheidend für das Gelingen der Industrietransformation

Die Transformation des Energiesystems muss durch eine Industrietransformation begleitet werden. Ein primärer Ansatzpunkt ist die Elektrifizierung industrieller Prozesse. So müssen bspw. in der Papier- und Glasindustrie bis 2045 fossil basierte Verbrennungsprozesse durch biomasse-basierte sowie durch eine Elektrifizierung vollständig substituiert werden. Wo eine direkte Elektrifizierung nicht möglich ist, kann Wasserstoff eine zentrale Rolle in der Industrietransformation spielen. Dies ist bspw. bei der Stahlherstellung der Fall, wo Wasserstoff für die Wärmebereitstellung sowie Direktreduktion verwendet werden kann. Mit dem zusätzlichen Einschmelzen von Stahlschrott in Elektrolichtbogenöfen kann die Stahlindustrie 2045 nahezu vollständig defossilisiert werden. Der industrielle Wasserstoffbedarf kann bei einer starken Zunahme der Wirtschaftsleistung und einer wachsenden Bevölkerung bis zu 335 TWh betragen. Der Wasserstoffbedarf wird insbesondere durch die Herstellung von Methanol getrieben, das für hochveredelte Chemikalien wie bspw. Ethylen und Propylen benötigt wird.



Die Elektrifizierung ist ein Kernbestandteil der Defossilisierung des Verkehrssektors – auch wenn wasserstoffbasierte Kraftstoffe in einzelnen Bereichen unabdingbar sind

Die Elektrifizierung des Verkehrssektors würde dessen energetische Effizienz von aktuell knapp 30 % auf knapp 60 % im Jahr 2045 mehr als verdoppeln. Infolgedessen wird die Endenergienachfrage im Verkehrssektor von derzeit ca. 600 TWh auf ca. 250 TWh sinken, ohne Berücksichtigung nennenswerter Verkehrsverlagerungen. Damit einhergehend vermindern sich die direkten Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor bis zum Jahr 2045 auf nahezu Null. Dahingegen sind beim Schiffs- und Flugverkehr sowie im Schwerlastverkehr die Möglichkeiten der Elektrifizierung beschränkt. Eine vollständige Defossilisierung ist hier nur mit defossilisierten, wasserstoffbasierten Kraftstoffen möglich.

Wasserstoffimporte sind für eine wirtschaftliche Defossilisierung insbesondere der Industrie und bestimmter Verkehrsträger unabdingbar

Der Wasserstoffbedarf der Industrie, einschließlich der Bedarfe durch den Schiffs- und Flugverkehr und als Langfristspeicher zur Rückverstromung, wird im Jahr 2045 zwischen 450 und 570 TWh jährlich betragen. Etwa ein Viertel kann durch inländische Produktion gedeckt werden; der Rest wird überwiegend per Pipeline importiert. Der rechtzeitige Aufbau einer entsprechenden internationalen Infrastruktur zum Wasserstofftransport, zur nationalen Verteilung und Speicherung, aber auch zur heimischen Erzeugung ist daher unerlässlich. Dabei muss darauf geachtet werden, dass geopolitische Abhängigkeiten durch eine Diversifizierung der Lieferländer und den langfristigen Aufbau von Energiepartnerschaften mit politisch stabilen Ländern minimiert werden.

Die Wärmewende im Gebäudesektor erfordert ein konzertiertes Zusammenspiel von energetischer Gebäudesanierung, Energieträgerwechsel und Ausbau der Strom- und Wärmenetze

Die Wärmewende im Gebäudesektor erfordert das konzertierte Zusammenspiel von energetischer Sanierung des Gebäudebestandes, energieeffizienten Neubauten und einer vollständigen Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Quellen bis zum Jahr 2045. Gemäß den Szenarien wird dabei die elektrisch betriebene Wärmepumpe die dominierende Technologie sein. Gut ein Drittel des Wärmebedarfs im Gebäudesektor kann aber durch netzgebundene Wärme bereitgestellt werden, die wiederum zum Großteil aus großen zentralen Wärmepumpen und Biomasse-KWK-Anlagen gespeist wird. Parallel zum Energieträgerwechsel muss durch eine ambitionierte energetische Sanierung des Gebäudebestandes (~2 % p.a.) der spezifische Energiebedarf pro Wohnfläche von aktuell ca. 120 kWh/(m<sup>2</sup>\*a)

auf durchschnittlich ca. 62 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) reduziert werden. Der zusätzliche Strombedarf durch den massiven Einsatz elektrischer Wärmepumpen, neben der Elektromobilität, erfordert eine bedarfsgerechte Ertüchtigung der Verteilnetzinfrastuktur. Um den Anteil an netzgebundener Wärme an der Gebäudewärme zu erhöhen, bedarf es weiterhin einen Ausbau des Wärmenetzes – wo energetisch und ökonomisch sinnvoll. Essenziell ist hierbei, dass regenerative Energiequellen in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen, um die Wärmenetze mit Energie zu versorgen.

Der Aufbau einer Infrastruktur für ein effektives CO<sub>2</sub>-Management ist unabdingbar, um unvermeidbare Treibhausgasemissionen z.B. aus Industrie und Landwirtschaft zu kompensieren

Ab dem Jahr 2040 bestimmen laut den untersuchten Szenarien nicht-vermeidbare Treibhausgasemissionen das klimarelevante Emissionsniveau in Deutschland. Die wesentlichen Emissionsquellen sind hierbei die Industrie und die Landwirtschaft: im Jahr 2045 sind es ca. 90 Mio. t CO<sub>2</sub>. Diese sind dauerhaft aus der Atmosphäre zu entfernen. Weiterhin werden im Jahr 2045 ca. 26 Mio. t CO<sub>2</sub> in Chemikalien und Methanol gebunden, die in den nachfolgenden Jahren am Ende deren Lebensdauer emittiert werden.

Die Abscheidung und geologische Einspeicherung (Carbon Capture and Storage (CCS)) wird heute als eine wesentliche Technologie gesehen, Treibhausgasemissionen dauerhaft zu entsorgen. CCS ist aber energie- und kostenaufwändig. Auch ist CCS in der Gesellschaft und Politik nicht unumstritten. Daher sollte sich der Aufbau eines geeigneten Transportnetzes für Kohlenstoffdioxid (bspw. Pipelines, auch umgewidmete Erdgaspipelines) und geeigneter Lagerstätten an dem Volumen der nicht-vermeidbaren Treibhausgasemissionen orientieren, um keine Anreize zu setzen, auch anderweitig vermeidbare Kohlenstoffdioxidemissionen geologisch zu speichern.

Die Energiewende erfordert geeignete Strategien, um den Bedarf an kritischen Ressourcen zu vermindern und potenziellen Rohstoffengpässen entgegenzuwirken

Die Energie- und Verkehrswende geht in allen Szenarien mit einem z.T. deutlichen Anstieg des Bedarfs bestimmter, häufig als strategisch angesehener, mineralischer Rohstoffe einher. Das sind bspw. Lithium, Kobalt, Nickel und Vanadium (primär relevant in Batterien), Neodym und Dysprosium (in Windkraftanlagen und Elektromotoren), Silber, Tellur, Selen, Gallium und Indium (in bestimmten Typen von Fotovoltaikmodulen). Aber auch der Bedarf an Industriemetallen wie Stahl, Kupfer und Aluminium wird durch die Energiewende weiterhin steigen. Der inländische Bedarf konkurriert zudem mit einer global schnell wachsenden

Nachfrage. Die notwendige globale Bedarfsdeckung muss dabei durch die Ausweitung der Gewinnung der Rohstoffe auf zu heutigen Marktbedingungen weniger rentable Lagerstätten erfolgen. Nicht zuletzt unterliegt die Versorgung mit vielen dieser Rohstoffe auch geopolitischen Risiken. Als Konsequenz könnte es zu Versorgungsengpässen mit entsprechenden Preisanstiegen kommen. Zur Minderung der Versorgungsrisiken können technische Entwicklungen (z.B. erhöhte Materialeffizienz, Recycling, Einsatz anderer funktionsäquivalenter Materialien), aber auch eine vorausschauende Rohstoffpolitik beitragen, die geopolitische Belange berücksichtigt.

### Eine nachhaltige Energiewende muss auch nicht-klimarelevante Emissionen, einschließlich der in den Vorketten entstehenden, beachten

Transformationsstrategien für das Energie- und Verkehrssystem zielen in aller Regel darauf ab, Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb von Anlagen und Fahrzeugen in Deutschland zu mindern. Dabei treten auch weitere Umweltwirkungen auf, die die Lebensbedingungen erheblich beeinträchtigen, wie bspw. Feinstaub- oder Stickoxidemissionen. Weiterhin entstehen Klima- und Umweltwirkungen auch bei der Herstellung der Technologien, der Bereitstellung von Rohstoffen und Energieträgern etc., die sich vielfach über Vorketten im Ausland manifestieren.



Die lebenszyklusbasierte Analyse von Umweltwirkungen der in den Szenarien abgebildeten Energiesysteme zeigt einerseits, dass Auswirkungen aus den Vorketten die Auswirkungen aus dem Betrieb einer Technologie z.T. deutlich übersteigen können, wie das z.B. bei Fotovoltaikmodulen oder Elektroautos der Fall ist. Zum anderen führt die Transformation hin zu einem klimafreundlichen Energie- und Verkehrssystem in der Regel zu einer Verbesserung der Qualität von Ökosystemen sowie von einigen Faktoren, die sich positiv auf die menschliche Gesundheit auswirken. Dahingegen erhöht sich der Verbrauch mineralischer Rohstoffe und die Landnutzung. Bei bestimmten für die menschliche Gesundheit relevante Faktoren wie karzinogene und nicht-karzinogene Effekte bestehen noch Unsicherheiten, inwiefern die Energiewende zu höheren Auswirkungen gegenüber heute führen kann.

### Die Transformation führt in der Gesamtbilanz zum Anstieg der inländischen Wertschöpfung, aber zu keinem substanziell veränderten Arbeitskräftebedarf

Die für die Energiesystemtransformation wichtigen Branchen, wie zum Beispiel Maschinenbau und Produktion elektrischer Ausrüstungen, können die an Bedeutung verlierenden Branchen, wie bspw. den konventionellen Automobilbau, kompensieren, so dass sich netto die inländische Beschäftigung nicht eindeutig verändert. Der Strukturwandel erhöht aber die inländische Bruttowertschöpfung. Die Entwicklung des Arbeitskräftebedarfs hängt hierbei von der Entwicklung des internationalen Wettbewerbs im Bereich der Herstellung von Zwischen- und Endprodukten ab. Nationale klimapolitische Alleingänge, die zu einer Verschlechterung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit inländischer Unternehmen führen, können hier die Gefahr des Abwanderns von international exponierten Industrien erhöhen. Tatsächlich zeigen die analysierten Szenarien, dass die Einhaltung der klimapolitischen Ziele mit dem Erhalt einer robusten industriellen Basis, der Schaffung inländischer Arbeitsplätze sowie der Förderung des Wirtschaftswachstums kompatibel ist. Wie zu erwarten, fallen in den Szenarien mit höherem Wirtschaftswachstum die Effekte etwas höher aus als in den Szenarien mit niedrigen Wachstumsraten. Dahingegen unterscheiden sich die Szenarien hinsichtlich der strukturellen Effekte nur gering.

### Die Entwicklung wesentlicher sozio-ökonomischer Randbedingungen beeinflusst die Möglichkeiten der Haushalte mit geringem Einkommen mit den transformationsbedingten finanziellen Mehrbelastungen umzugehen

Die Belastung von privaten Haushalten mit geringem Einkommen wird durch die Entwicklung einer Reihe von sozio-ökonomischen Randbedingungen wesentlich beeinflusst. Zu nennen sind, neben der Entwicklung des Einkommens, die Lage auf dem Arbeitsmarkt (geringer oder hoher Bedarf an Geringverdienenden), die grundsätzliche Ausgestaltung des Sozialversicherungssystems (hohe oder geringe Bedeutung der eigenverantwortlichen Vorsorge in der Sozialversicherung), aber auch die Werteorientierung der Gesellschaft (geringe oder starke Bedeutung von Solidarität oder Postmaterialismus in der Gesellschaft). In jedem Szenario konkurrieren entlastende Faktoren, wie bspw. Einkommensentwicklung und Arbeitsmarktlage, mit belastende, wie zum Beispiel hohe Bedeutung der eigenverantwortlichen Vorsorge. Man kann feststellen, dass sich die Situation der Geringverdienenden in den Szenarien mit einem geringen Wirtschaftswachstum und Bevölkerungsrückgang tendenziell verschlechtert, während die Lage bei einem hohen Wirtschaftswachstum und Bevölkerungswachstum tendenziell unverändert bleibt.

Die Internalisierung externer Kosten stellt eine wesentliche Gelingensbedingung für die Nachhaltigkeitstransformation des Energiesystems dar

Ziel der Internalisierung externer Kosten ist es, durch Produktions- oder Konsumaktivitäten entstehende ökologische und soziale Folgekosten, die normalerweise von der Allgemeinheit getragen werden müssen, dem Verursacher zuzurechnen, damit dieser sie in seinem Entscheidungskalkül einbezieht. Dies kann durch ordnungspolitische Maßnahmen (Ge-/Verbote, Grenzwerte, ...), marktbasierende Maßnahmen (Steuern, Abgaben, ...), Mischformen (z. B. Zertifikathandel) sowie informatorische Maßnahmen (Labelling, Stakeholderveranstaltungen, ...) erfolgen.

Es zeigt sich, dass in einem Szenario mit einer relativ schlechten wirtschaftlichen Entwicklung mit steigender sozialer Ungleichheit im Inland, einer eher konfrontativen und fragmentierenden globalen und EU-weiten politischen und wirtschaftlichen Entwicklung sowie innovationsschwachen Akteuren die Bedingungen für eine Internalisierung mit Blick auf die gesellschaftliche Akzeptanz entsprechender Maßnahmen und die Bereitschaft der Politik, sie umzusetzen, besonders ungünstig sind. Positiv wirkende Faktoren wie eine stärkere Fokussierung der Regierung auf Klimapolitik sowie eine grundsätzlich zur Energiewende und Energiesparsamkeit (Suffizienz) positiv eingestellte Bevölkerung werden dadurch überkompensiert. In einem national, europäisch und global besseren wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfeld sind die Bedingungen für eine Internalisierung deutlich günstiger. Neben den genannten positiv wirkenden Faktoren liegt dies insbesondere an einer höheren und mit weniger Ungleichheit einhergehender Wirtschaftsentwicklung, höherer Innovationskraft der Wirtschaft und einer eher an Werten wie Gemeinschaftssinn und Postmaterialismus orientierten Gesellschaft.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die analysierten Szenarien stellen eine Bandbreite möglicher Entwicklungen dar. Allen Szenarien ist gemein, dass das klimapolitische Ziel der Klimaneutralität 2045 erreicht wird. Allerdings unterscheiden sich die szenarienbedingten Herausforderungen an die Energiepolitik – wie auch an die Wirtschafts-, Sozial-, Arbeitsmarkt-, Umwelt- und Außenhandelspolitik – deutlich.

Die notwendige Einbindung unterschiedlicher, aber in sich konsistenter sozio-ökonomischer Entwicklungen in die Szenariengestaltung und -analyse zur Identifikation geeigneter Transformationspfade ermöglicht die für eine ganzheitliche Diskussion notwendige Einbeziehung der Komplexität der Energiesystemtransformation. Dadurch werden auch mögliche Zielkonflikte schon im Rahmen der Szenarienanalyse deutlich. Ein Beispiel hierfür sind etwa die erforderlichen Investitionen in neue transformationsfördernde Infrastrukturen und die dadurch – ohne kompensierende Maßnahmen – entstehenden zusätzlichen Belastungen der privaten Haushalte. Hiervon werden besonders die ohnehin bereits stark belasteten, einkommensschwächeren Haushalte betroffen. Oder auch die für die Bereitschaft zur Unterstützung der Energiewende erforderliche wirtschaftliche Prosperität mit den damit verbundenen Umweltbelastungen sowie höheren Rohstoffbedarfen können in einem Konflikt zueinander stehen. Das Ausmaß des Konflikts hängt vom Erfolg möglicher Entkopplungsstrategien ab. Eine derart erweiterte Szenarienanalyse und -bewertung erlaubt es, schon frühzeitig Handlungsnotwendigkeiten zu identifizieren, die in der Regel in einer rein techno-ökonomisch dominierten Analyse nicht gesehen werden.

Darauf aufbauend kann die Wissenschaft der Politik und der Gesellschaft Instrumente anbieten, um in gesellschaftlichen Diskursen frühzeitig geeignete Maßnahmen zu entwickeln, bevor ggf. kostspielige Entscheidungen getroffen werden, die letztlich keinen oder nur einen geringen Beitrag zur notwendigen Transformation leisten.

Eine in der skizzierten Weise weiterentwickelte und verbesserte integrative Szenarienganalysemethodik geht mit erhöhter Komplexität und damit erhöhtem Aufwand einher. Es entstehen aber vielfältige Bilder aus positiven und negativen Wirkungen eines Klimaneutralitätspfad auf verschiedene Nachhaltigkeitsaspekte. Eine wesentliche methodische Herausforderung besteht darin, in dieser multikriteriellen Entscheidungssituation valide handlungsleitende Aussagen abzuleiten. Die fortgesetzte Weiterentwicklung der Methodik wird daher vor allem eine Erweiterung und Anpassung der in den Kontextszenarien zu berücksichtigenden Faktoren angesichts veränderter geopolitischer, gesellschaftlicher wie auch technischer Gegebenheiten umfassen, ebenso die Verbesserung der Bewertungsmethodik, etwa anhand einer systematischen Integration von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA) unter Einbeziehung relevanter Stakeholder.

#### PRODUKTION

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Campus Services (CSE) - Medienproduktion (MEP)  
Layout und Satz: Mediengestaltung  
[www.cse.kit.edu](http://www.cse.kit.edu)

#### KONTAKT

Dr. Stefan Vögele  
Forschungszentrum Jülich (FZJ)  
Institute of Climate and Energy Systems -  
Jülicher Systemanalyse (ICE-2)  
Telefon: +49 2461 61-3393  
Fax: +49 2461 61-6695  
E-Mail: [s.voegele@fz-juelich.de](mailto:s.voegele@fz-juelich.de)  
[www.fz-juelich.de/de/ice/ice-2](http://www.fz-juelich.de/de/ice/ice-2)

#### HERAUSGEBER

Helmholtz Energy  
Programm Energiesystemdesign (ESD)  
[www.esd.kit.edu](http://www.esd.kit.edu)