



ENTWICKLUNGSPFADE AUS DEM  
ENSURE-PROJEKT

# TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS BIS ZUM JAHR 2030

**KOPERNIKUS**  
ENSURE **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## **Autoren\***

*Witold-Roger Pogonietz (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))*

*Christof Timpe (Öko-Institut)*

*Liv Becker (Deutsche Umwelthilfe)*

*Tim Höfer (RWTH Aachen)*

*Matthias Koch (Öko-Institut)*

*Dominik Seebach (Öko-Institut)*

*Annika Weiss (Karlsruher Institut für Technologie (KIT))*

*Theresa Wildgrube (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI))*

\* Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Broschüre immer die männliche Form verwendet. Gemeint sind jedoch explizit Personen aller Geschlechter.

# INHALTSVERZEICHNIS

Seite	4	<b>1. Einleitung</b>
Seite	8	<b>2. Stakeholder-basierte Entwicklungspfade</b>
Seite	12	<b>3. Entwicklungspfade für das Energiesystem</b>
Seite	13	3.1. Einleitung
Seite	14	3.2. Entwicklungspfad A: Referenzentwicklung
Seite	15	3.3. Entwicklungspfad B: Ambitionierter Klimaschutz
Seite	17	3.4. Entwicklungspfad C: Stärker europäisch orientierte Energiewende mit ambitionierten Klimazielen
Seite	18	3.5. Entwicklungspfad D: Dezentrale Energiewende mit ambitionierten Klimazielen
Seite	19	3.6. Die Entwicklungspfade im Vergleich
Seite	24	<b>4. Die Sicht der Stakeholder</b>
Seite	25	4.1. Ziele der Energiewende
Seite	27	4.2. Zielerreichung der Entwicklungspfade
Seite	29	4.3. Bewertung der Entwicklungspfade
Seite	34	<b>5. Fazit und Ausblick</b>





Das Projekt ENSURE erforscht neue Energienetzstrukturen im Zuge der Herausforderungen durch den Klimawandel. Vier Entwicklungspfade, entwickelt mit ausgewählten Stakeholdern, zeigen Möglichkeiten für ein klimafreundlicheres Energiesystem auf.

## 1. EINLEITUNG

Die Analysen des Weltklimarats der Vereinten Nationen (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change), aber auch die weltweite Häufung von anormalen Wetterlagen in den letzten Jahren, haben wiederholt die Notwendigkeit verdeutlicht, Maßnahmen zu verstärken, um den Klimawandel auf ein vertretbares Maß zu begrenzen. Im Mittelpunkt der vielen Diskussionen um mögliche Maßnahmen steht das Energiesystem, wobei auch der Verkehrssektor und die Gebäudewirtschaft immer stärker in die Debatten einbezogen werden. Der schon stattfindende Wandel des Energiesystems, speziell bei der Bereitstellung von Elektrizität, wird aber vielfach als nicht ausreichend angesehen. Um die Transformation des Energiesystems zu beschleunigen, diese aber gleichzeitig möglichst effizient und gesellschaftlich verträglich zu gestalten, hat vor etwa vier Jahren das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Kopernikus-Projekte initiiert.

Eines dieser Projekte ist **ENSURE** (neue **EnergieNetzStruktURen** für die **Energiewende**). Dieses verfolgt mit einem ganzheitlichen systemischen Ansatz das Ziel, neue Energienetzstrukturen für die notwendigen tiefgreifenden Anpassungen der elektrischen Energieversorgung sowie der Kopplung verschiedener Energieträger und Sektoren zu erforschen und bereitzustellen. Die Notwendigkeit einer Transformation ergibt sich hierbei aus den Klimaschutzpolitischen Zielen der Bundesregierung. In ihrem Klimaschutzplan 2050, der die Vereinbarungen aus dem Pariser Klimaschutzabkommen aus dem Jahr 2015 berücksichtigt, verpflichtet sich die Bundesregierung ihre Klimaschutzpolitik an dem Leitbild einer weitgehenden Treibhausgasneutralität zu orientieren.

Die grundlegende Fragestellung in **ENSURE** ist, welchen Anteil jeweils zentrale und dezentrale Versorgungs-

elemente unter techno-ökonomischen, umweltbezogenen und gesellschaftlichen Randbedingungen am Gesamtsystem einnehmen sollten und welche Anpassungen in den Übertragungs- und Verteilnetzen hierfür notwendig sind. Neue Systemstrukturen und Technologien sind für die weitere Transformation von zentraler Bedeutung. Die im Projekt identifizierten Lösungsansätze sollen in einem geografisch abgegrenzten „Energiekosmos [ENSURE](#)“ demonstriert werden. Hier soll die Umsetzung der Erkenntnisse des Projektes in einer Region Deutschlands unter Realbedingungen erprobt werden. Die zu entwickelnden Netzstrukturen sollen nicht nur die Ansprüche der Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit erfüllen. Für eine gelungene Implementierung neuer Netzstrukturen bedarf es auch einer adäquaten Einbindung der Bürger.

Im Klimaschutzplan 2050 wird das Leitbild für die Transformation zu einer klimaverträglichen Volkswirtschaft für das Jahr 2050 festgelegt. Zusätzlich werden für das Jahr 2030 sektorenbezogene Emissionsziele vorgelegt. Mit dem Leitbild und auch mit den sektorenbezogenen Emissionszielen sind aber weder Aussagen über die konkrete Ausgestal-

tung des zukünftigen Energiesystems noch über die Pfade zu einem „neuen“ Energiesystem verbunden. Tatsächlich bestehen vielfältige Möglichkeiten, die Klimaschutzziele und die damit verbundenen energiepolitischen Ziele zu erreichen. Diese Möglichkeiten auszuleuchten, ist Teil der Arbeiten in [ENSURE](#).

Mit der konkreten Ausgestaltung des Energiesystems werden unterschiedliche technische und ökonomische Anforderungen an das Netzsystem verbunden sein. Daher ist es für die Entwicklung entsprechender Technologien und deren Anwendung hilfreich, Vorstellungen über das zukünftige Energiesystem und über entsprechende Entwicklungspfade zu haben. Entwicklungspfade dienen dazu, systematisch mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiesystems abzubilden. Dabei werden die heutigen Kenntnisse und Erwartungen über den technischen Fortschritt, aber auch mögliche Politikmaßnahmen als Grundlage für die Bildung von Entwicklungspfaden genommen. Die ausgewählten Entwicklungspfade sollten konsistent und plausibel sein, sie können jedoch keine sicheren Vorhersagen darstellen.

Im Rahmen von [ENSURE](#) wurden mit Hilfe einer sorgfältig ausgewählten Gruppe von Stakeholdern mögliche Entwicklungspfade des Energiesystems bis zum Jahr 2030 aus gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und technischer Sicht identifiziert und auch bewertet. Die Stakeholder repräsentieren wichtige Akteure aus verschiedenen Bereichen der Gesellschaft, wie zum Beispiel Industrie und Umweltverbände. Die entwickelten und bewerteten Entwicklungspfade

dienen gleichzeitig als eine sozio-ökonomische Rahmung für die Forschungsarbeiten des ENSURE-Projektes.

In dieser Broschüre wollen wir Ihnen die Ergebnisse der Arbeiten zu den Entwicklungspfaden vorstellen.

Insgesamt wurden vier im Folgenden skizzierte Entwicklungspfade identifiziert:

- A Referenzentwicklung**
- B Ambitionierter Klimaschutz**
- C Stärker europäisch orientierte Energiewende mit ambitionierten Klimazielen**
- D Dezentrale Energiewende mit ambitionierten Klimazielen**

Der Entwicklungspfad A basiert auf den Vorgaben für den Netzentwicklungsplan 2030 (Szenario B), wie sie nach einem umfangreichen Konsultationsverfahren durch die Bundesnetzagentur festgelegt wurden. Auf diesem Entwicklungspfad würden die Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2030 um knapp 55 % gegenüber 1990 sinken. Dies entspricht in etwa den Vorgaben des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung. Gegenüber den drei weiteren Entwicklungspfaden weist der Entwicklungspfad A das vergleichsweise geringste Ambitionsniveau bezüglich der Reduktion der Treibhausgasemissionen auf. Andererseits impliziert er gegenüber der aktuellen Entwicklung eine Verdopplung der Reduktionsanstrengungen.

Das Ambitionsniveau des Entwicklungspfades B zielt hingegen darauf ab, einen Anstieg der durchschnittlichen globalen Temperaturen gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf deutlich

unter 2°C zu halten, entsprechend der Verpflichtung aus dem Pariser Klimaschutzabkommen. Um hierzu einen angemessenen Beitrag zu leisten, müssen die Treibhausgasemissionen in Deutschland auf dem Entwicklungspfad B bis zum Jahr 2030 um 78 % sinken. Dies würde selbst die von der Bundesregierung bisher für 2040 angestrebte Emissionsreduktion von 70 % noch weit übertreffen. Das Ambitionsniveau dieses Entwicklungspfades bewegt sich deutlich jenseits der Grenze bisher ausgearbeiteter Energieszenarien.

Die Entwicklungspfade C und D sind gegenüber dem Entwicklungspfad B moderater. Sie unterstellen eine Verminderung der Treibhausgasemissionen bis 2030 um 67 % und entsprechen damit einem Pfad zur Verminderung der Emissionen bis 2050 um ca. 95 % gegenüber 1990. Die beiden Entwicklungspfade unterscheiden sich wesentlich in der konkreten Ausgestaltung des Energiesystems. Der Entwicklungspfad C unterstellt eine enge Einbettung in eine europäische Energiewende, wobei die Elektrizitätsbereitstellung europaweit primär an optimalen Standorten erfolgt. Der notwendige Transport von Elektrizität über weite Strecken würde einen verstärkten Ausbau des europäischen und des inländischen Übertragungsnetzes bedeuten. Dahingegen nimmt der Entwicklungspfad D eine lastnahe Bereitstellung an. Das heißt, die Standorte zur Elektrizitätserzeugung befinden sich möglichst in der Nähe der (inländischen) Abnehmer. Erwartet wird hierbei, dass der Ausbaubedarf des inländischen Übertragungsnetzes gegenüber dem Entwicklungspfad C geringer ausfallen würde.



Elf Stakeholder haben in Workshops und Telefonkonferenzen vier denkbare Entwicklungspfade gestaltet. Der Verlauf der Energiewende bis zum Jahr 2030 wurde durch Eckpunkte definiert.



## 2. STAKEHOLDER-BASIERTE ENTWICKLUNGSPFADE

Im Rahmen des **ENSURE**-Projektes wurden Entwicklungspfade für den weiteren Verlauf der Energiewende aufgezeigt, deren wesentliche Eckpunkte durch die ausgewählten gesellschaftlichen Akteure festgelegt wurden. Die Anforderung an diese Pfade war, dass sie in sich konsistent mögliche Entwicklungen in allen relevanten Sektoren beschreiben und gesellschaftlich akzeptabel erscheinen. Die Gesamtheit der Pfade soll den Raum der aus heutiger Sicht realistisch erscheinenden Entwicklungen aufspannen. Zugleich sollen sie die inneren Logiken und treibenden Größen erkennbar machen, die die jeweiligen Entwicklungen prägen.

Die Erarbeitung der Entwicklungspfade erfolgte in zwei Schritten:

- › Im ersten Schritt wurden in enger Interaktion mit der Stakeholdergruppe sogenannte Storylines entwickelt. Storylines beschreiben, überwiegend qualitativ, mögliche zukünftige Entwicklungen der Energiewende in Deutschland.
- › Im zweiten Schritt wurden diese Storylines mit Hilfe von energiewirtschaftlichen Modellen in eine detaillierte, quantifizierte Beschreibung der verschiedenen Sektoren des Energieverbrauchs und der Energiebereitstellung übertragen.

Das Ergebnis beider Schritte beschreibt die Entwicklungspfade.

Zur Festlegung der wesentlichen Eckpunkte der Entwicklungspfade wurde eine Gruppe aus elf festen Mitgliedern gebildet. Die Auswahl und Einladung der Stakeholder erfolgte in einem mehrstufigen Prozess. Zunächst wurde durch das Projektteam eine umfangreiche Liste an Verbänden und Organisationen aus den verschiedenen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bereichen erstellt sowie aktuelle energie- und klimapolitische Stellungnahmen dieser Organisationen recherchiert und systematisch ausgewertet. Die Stellungnahmen wurden dabei entsprechend ihrer Aussagen zu 20 Kernfragen der Energiewende (z. B. Netzausbau, Effizienz, Klimaschutz, Sektorenkopplung, Räumliche Verteilung, erneuerbare Energien, etc.) eingeteilt, um die Bandbreite der Positionen in der (Energie-)Wirtschaft und Gesellschaft zu erfassen. Damit sowohl die Bandbreite der energiepolitischen Debatte, als auch die gesellschaftliche Bandbreite in Deutschland angemessen in der Gruppe repräsentiert waren, erfolgte die Einladung der Stakeholder unter Berücksichtigung der Heterogenität der ausgewerteten Positionen sowie einer möglichst breiten gesellschaftlichen Vertretung durch die Organisationen.



Die ausgewählten, an der Erstellung der Entwicklungspfade für die Energiewende beteiligten Organisationen sind:

- › Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)
- › Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE)
- › Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)
- › Bund für Umwelt und Naturschutz (BUND)
- › Deutscher Gewerkschaftsbund (DGB; zu Beginn des Prozesses beteiligt)
- › Deutscher Landkreistag (DLT)/ Deutscher Städtetag (DST)
- › Kommissariat der deutschen Bischöfe – Katholisches Büro in Berlin
- › Verband Kommunaler Unternehmen (VKU)
- › Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv)
- › WWF Deutschland
- › Hinzu kommt ein Verband aus dem Bereich Land- und Forstbewirtschaftung.

Die elf Stakeholder der Gruppe haben in insgesamt sieben Workshops und zwei Telefonkonferenzen die wesentlichen Entscheidungen zur Gestaltung der Entwicklungspfade für die Energiewende bis 2030 getroffen und die Grundlagen für die individuelle Bewertung festgelegt. Sie haben dabei gleichberechtigt auf

Basis ihres jeweiligen Wissens und ihrer Werte miteinander diskutiert. Das **ENSURE**-Projektteam hat sich in den Prozess der Storyline-Entwicklung eingebracht, indem es den methodischen Rahmen für die Arbeit der Stakeholder aufgestellt und umfangreiches Expertenwissen für die Stakeholdergruppe bereitgestellt hat. Alle Personen aus dem **ENSURE**-Projektteam waren dabei angehalten, sich in den Workshops mit eigenen Werturteilen oder konkreten Empfehlungen an die Stakeholder zur Gestaltung der Storylines zurückzuhalten und Fragen soweit wie möglich wertfrei zu beantworten. Damit folgt das gewählte Vorgehen der Methodik der „partizipativen Modellierung“, die bereits in einem früheren Projekt zur Analyse des Bedarfs zum Ausbau der Strom-Übertragungsnetze angewendet wurde ([www.transparenz-stromnetze.de](http://www.transparenz-stromnetze.de)).

Die von den Stakeholdern überwiegend qualitativ beschriebenen Storylines wurden dann in einem weiteren Schritt in quantitative energiewirtschaftliche Szenarien umgesetzt. Hierzu hat das Projektteam verschiedene Energiesystemmodelle eingesetzt (PowerFlex-Grid-EU, DIMENSION).





Die Entwicklungspfade kombinieren qualitative Beschreibungen von zukünftigen Energiesystemen mit quantitativen Modellberechnungen zum jeweiligen Energiebedarf, dessen Deckung und den hierbei entstehenden Emissionen.







Die betrachteten Entwicklungspfade decken eine große Bandbreite ab. Sie reicht von einer Referenzentwicklung auf Grundlage bereits erfolgter politischer Festlegungen bis hin zu einem sehr ambitionierten Klimaschutzpfad, der über die bisher diskutierten Szenarien zur Emissionsreduktion hinaus geht.

## 3. ENTWICKLUNGSPFADE FÜR DAS ENERGIESYSTEM

### 3.1. Einleitung

Die Entwicklungspfade beziehen sich auf den Zeithorizont bis zum Jahr 2030 und berücksichtigen mögliche langfristige Entwicklungen bis zum Jahr 2050. Der Horizont 2030 wurde gewählt, weil dies der Zeitpunkt ist, zu dem die im Vorhaben ENSURE entwickelten Technologien und Konzepte für künftige Energienetze in der Praxis angewendet werden sollen.

Für alle vier Entwicklungspfade wurden zentrale Rahmenbedingungen einheitlich festgelegt. So wird erwartet, dass die Bevölkerungszahl in Deutschland gegenüber heute etwa konstant bleibt und im Jahr 2030 bei ca. 83 Mio. Personen liegen wird. Die gesamte Wohnfläche steigt gegenüber dem heutigen Wert mit 0,33 % pro Jahr nur noch geringfügig weiter an. Auch für die Wirtschaft wird eine moderate Entwicklung unterstellt: Das Bruttoinlandsprodukt steigt real um durchschnittlich 0,83 % pro Jahr. Für

die realen Preise fossiler Energieträger werden entsprechend dem „New Policies Scenario“ des IEA World Energy Outlook 2017 deutliche Steigerungen bei Erdöl (+6,1 % p. a.) und Erdgas (+4,1 % p. a.) und moderate Steigerungen bei Steinkohle (+1,7 % p. a.) angenommen. Weiter wird generell eine stabile gesellschaftliche Entwicklung ohne Umbrüche unterstellt. Die global spürbaren Effekte des Klimawandels haben bis zum Jahr 2030 keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Rahmenannahmen der Szenarien.

Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal der Entwicklungspfade sind deren unterschiedlichen Annahmen für die Ambition der Klimaschutzpolitik: Der Entwicklungspfad A entspricht etwa den aktuellen Zielstellungen der Bundesregierung für die Minderung der Treibhausgasemissionen. Die Entwicklungspfade C und D lehnen sich an die ambitioniertesten der bisher betrachteten Klimaschutzszenarien an, die bis 2050 von einer Minderung

der klimarelevanten Emissionen um 95 % gegenüber 1990 ausgehen. Hierbei beschreibt Entwicklungspfad C eine stark europäisch integrierte Entwicklung, während Entwicklungspfad D eine möglichst dezentral organisierte Energie-wende abbildet. Der Entwicklungspfad B stellt im Vergleich zu den anderen Pfaden eine noch ambitioniertere Strategie dar, in der eine besonders schnelle Reduktion der Emissionen bereits bis zum Jahr 2030 unterstellt wird.

### 3.2. Entwicklungspfad A: Referenzentwicklung

Der Entwicklungspfad A „Referenzentwicklung“ geht im Stromsektor von den Annahmen aus, die im Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans 2030 (dort als „Szenario B“ bezeichnet) durch die Bundesnetzagentur festgelegt wurden. Im Wärme- und Verkehrssektor wird ein dem Stromsektor vergleichbares Ambitionsniveau unterstellt. Die Klimaschutzziele der Bundesregierung für die einzelnen Sektoren werden überwiegend erreicht. Dies gilt insbesondere für den Energiesektor, während die Ziele im Verkehrssektor leicht verfehlt werden: Diese könnten nur durch Maßnahmen erreicht werden, die aktuell nicht zur Umsetzung vorgesehen sind und daher nicht Bestandteil eines Referenzszenarios sein können. Daher wird bis 2030 über alle Sektoren hinweg nur eine Treibhausgasemissionsreduktion um 53 % anstelle des Reduktionsziels der Bundesregierung von 55 % gegenüber dem Jahr 1990 erreicht. Der Anteil der erneuerbaren Stromerzeugung steigt gemäß der Vereinbarungen im Koalitionsvertrag der Bundesregierung auf 65 % an. Dies geht mit einer

Reduktion der installierten Leistung an Braun- und Steinkohlekraftwerken von 46,3 Gigawatt (GW) im Jahr 2017 auf 19,1 GW im Jahr 2030 einher. Daraus resultiert eine Kraftwerksleistung, die 2,1 GW über dem von der Kommission für Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung der Bundesregierung (der sog. „Kohlekommission“) vorgeschlagenen Wert von insgesamt 17 GW im Jahr 2030 liegt. Der Einsatz der Kraftwerke wird im Rahmen eines bundesweit einheitlichen Strommarkts festgelegt.

Das Übertragungsnetz wird so ausgebaut, wie es der genehmigte Netzentwicklungsplan 2030 vorsieht. Entsprechend der Annahmen des Netzentwicklungsplans wird für das europäische Umfeld eine Entwicklung des Stromsektors unterstellt, welche sich an dem Szenario „Sustainable Transition 2030“ des von den europäischen Übertragungsnetzbetreibern (ENTSO-E) im Jahr 2018 veröffentlichten Ten-Year-Network-Development-Plans (TYNDP) orientiert. Zum Management der fluktuierenden Stromerzeugung aus erneuer-





baren Energien trägt ein Zubau sowohl von Kurzzeit- wie auch Langzeitspeichern bei (u. a. 8 GW PV-Batteriespeicher). In den Sektoren Wärme und Verkehr wird die Energiewende ebenfalls mit moderatem Anspruch vorangetrieben. Im Wärmesektor werden hierzu Wärmepumpen sowie eine Kombination aus verbessertem Wärmeschutz der Gebäude und einem erhöhten Anteil thermisch genutzter erneuerbarer Energien (v. a. Solarthermie) eingesetzt. Im Verkehrssektor werden moderate Einsparungen durch Fahrzeuge mit geringerem Kraftstoffverbrauch, einem moderaten Anstieg der Zahl von Elektrofahrzeugen und leichte Verschiebungen der Verkehrsnachfrage vom Individualverkehr hin zum öffentlichen Verkehr erreicht.

### 3.3. Entwicklungspfad B: Ambitionierter Klimaschutz

Der Entwicklungspfad B „Ambitionierter Klimaschutz“ ist darauf angelegt, einen verantwortungsvollen Beitrag Deutschlands zum Erreichen der ambitioniertes-

ten Zielvorgabe aus dem Klimaschutzabkommen von Paris zu leisten, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, möglichst auf 1,5 °C zu begrenzen (vgl. Kasten unten). Das hieraus abgeleitete Reduktionsziel für die deutschen Treibhausgasemissionen von 78 % bis 2030 und Nettoemissionen von Null ab dem Jahr 2050 lassen sich nur durch System- und Verhaltensänderungen herbeiführen, welche sich an oder auch deutlich jenseits der Grenze bisher ausgearbeiteter Energiewendeszenarien bewegen.

Um diese Minderungsziele zu erreichen, müssen die verfügbaren Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz und zum Ausbau der erneuerbaren Energien weitgehend ausgereizt werden. In Anbetracht des enorm hohen Ambitionsniveaus kann eine solche Emissionsreduktion nicht durch einen dezentralen oder zentralen Ansatz der Energiewende erreicht werden. Vielmehr müssen nahezu sämtliche verfügbaren Potenziale insbesondere zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien genutzt werden. So steigt der Anteil der erneuerbaren

## Der „verantwortungsvolle Beitrag“ Deutschlands zum Klimaschutz

Der Weltklimarat der Vereinten Nationen (IPCC) hat durch Auswertung von Modellrechnungen abgeschätzt, dass die von Menschen verursachte Erderwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % auf 1,5 °C begrenzt werden kann, wenn ab dem Jahr 2015 (in dem das Klimaschutzabkommen von Paris geschlossen wurde) weltweit nur noch Kohlenstoffdioxid im Umfang von ca. 865 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> ausgestoßen werden. Der Anteil Deutschlands an diesem globalen Kohlenstoffdioxidbudget wurde ermittelt, indem das gesamte Budget so auf die Länder der Welt verteilt wird, wie es der Verteilung der Weltbevölkerung im Jahr 2015 entsprach. Hieraus ergibt sich für Deutschland ein verbleibendes Budget von ca. 10 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> ab dem Jahr 2015. Von diesem Budget wurde durch das in den Jahren 2015 bis 2018 emittierte Kohlenstoffdioxid bereits etwa ein Drittel verbraucht. Um das Budget einzuhalten, müssen die Emissionen in Deutschland bis 2030 um ca. 78 % gegenüber 1990 reduziert werden.

Energien an der Stromerzeugung bis 2030 auf 83 %, während der Kohleausstieg schon vor 2030 vollständig vollzogen ist und die Stromerzeugung aus Gas bei unter 15 % liegt. Der Strombedarf wird einerseits durch verstärkte Energieeffizienz und Suffizienz reduziert, andererseits durch eine zunehmende Elektrifizierung der Sektoren Industrie, Wärme und Verkehr erhöht. Im Saldo steigt die Stromnachfrage gegenüber dem Stand von 2017 um etwa 9 % an. Die beschleunigte Energiewende im Stromsektor erfordert auch einen umfangreicheren Ausbau der Übertragungsnetze als im genehmigten Netzentwicklungsplan 2030 vorgesehen. Es wird eine vierte HGÜ-Trasse (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) von Niedersachsen nach Nordrhein-Westfalen benötigt (Korridor B Nord). Auch die Verteilnetze müssen voraussichtlich schneller als in den anderen Entwicklungspfaden verstärkt und digitalisiert werden. Der rasche Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung führt zu deutlich erhöhten Flächenkonkurrenzen.

Um die ambitionierten Klimaschutzziele umzusetzen, müssen die Wärme- und die Verkehrswende ebenfalls deutlich schneller umgesetzt werden als in den anderen Entwicklungspfaden. Der Beitrag des Verkehrssektors umfasst eine schnelle Einführung der Elektromobilität: Hier wird im Jahr 2030 von 7 Mio. batterieelektrischen Fahrzeugen und 6 Mio. Plugin-Hybriden ausgegangen. In 2017 betrug die Anzahl von batterieelektrischen Fahrzeugen und Hybriden ca. 200.000 Fahrzeuge. Auch im Bereich der Nutzfahrzeuge setzen sich elektrische Antriebe verstärkt durch. Die Elektromobilität im Straßenverkehr

verursacht insgesamt einen Strombedarf von 35 Terawattstunden (TWh). Darüber hinaus wird ein grundlegend verändertes Mobilitätsverhalten unterstellt: Gegenüber dem Stand des Jahres 2017 geht die Nutzung von PKW um 18 % zurück, während der Personenverkehr auf der Schiene um mehr als 49 % zunimmt. Weitere Annahmen betreffen hohe Effizienzgewinne bei den Fahrzeugen sowie einen beträchtlichen Import von synthetischen Kraftstoffen, die im Ausland auf Basis von erneuerbarem Strom erzeugt werden.

Der Energiebedarf von Gebäuden sinkt gegenüber dem heutigen Stand stark. Ein großer Anteil der Wärmeversorgung erfolgt über Wärmenetze, die zum überwiegenden Anteil an erneuerbare Heizwerke, ggf. mit Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung, angeschlossen sind. Der Stromverbrauch im Wärmebereich durch Wärmepumpen und Power-to-Heat steigt auf ca. 60 TWh.

Entsprechend dem hohen Ambitionsniveau auf nationaler Ebene wird auch eine ambitionierte gesamteuropäische Energiewende unterstellt: Der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Europa steigt im Jahr 2030 auf über 58 % an. Hierdurch wird vor allem die Erzeugung aus Kohle verdrängt. Diese Entwicklung entspricht einer um fünf Jahre beschleunigten Umsetzung des im Entwicklungspfad A angenommenen Szenarios für den Umbau des europäischen Stromsystems. Um den gestiegenen Anforderungen im europäischen Strommarkt gerecht zu werden, liegt die Kapazität der grenzüberschreitenden Stromtrassen 15 % über dem im TYNDP 2018 beschriebenen Referenzpfad.

### 3.4. Entwicklungspfad C: Stärker europäisch orientierte Energiewende mit ambitionierten Klimazielen

Der Entwicklungspfad C orientiert sich am Verlauf der Treibhausgasreduzierung im Klimaschutzszenario 95 der Studie „Klimaschutzszenario 2050“ aus dem Jahr 2015 (<https://www.bmu.de/download/ergebnisse-des-projekts-klimaschutzszenarien-2050/>). Dieses Ambitionsniveau entspricht dem Mindestanspruch des Pariser Klimaschutzabkommens, die Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen. Daraus ergibt sich ein Emissionsbudget für Deutschland von ca. 12 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> ab dem Jahr 2015, also etwa 20 % mehr als im Entwicklungspfad B. Hieraus lassen sich ein Minderungsziel für die deutschen Treibhausgasemissionen von 67 % bis 2030 und Nettoemissionen von Null ab dem Jahr 2050 ableiten. Eine solche Entwicklung entspricht den ambitioniertesten, bisher ausgearbeiteten Energiewendeszenarien. Um diese Ziele zu erreichen, werden im Entwicklungspfad C u.a. die grenzüberschreitende Zusammenarbeit im Stromsektor intensiviert und das Minderungsziel im EU-Emissionshandel verschärft.

Auf europäischer Ebene wird eine ebenso beschleunigte Energiewende unterstellt wie in Entwicklungspfad B. Demnach steigt der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Europa auf über 58 % an und verdrängt damit einen großen Anteil der Stromerzeugung aus Kohle. Wie in Entwicklungspfad B wird die Kapazität der grenzüberschreitenden Stromtrassen beschleunigt ausgebaut.

Die Elektrifizierung der Sektoren Industrie, Wärme und Verkehr ist gegenüber dem Entwicklungspfad B schwächer ausgeprägt. Mit einer verstärkten Energieeffizienz bleibt die Stromnachfrage gegenüber dem Jahr 2017 im Saldo etwa konstant. Der Anteil erneuerbarer Stromerzeugung liegt im Jahr 2030 bei 72 % des Bruttostromverbrauchs. Dabei werden vorrangig die kostengünstigsten Standorte für Windkraft und Photovoltaik genutzt, auch wenn diese nicht nahe an den Verbrauchsschwerpunkten liegen. Bei der Windkraft wird auch der Ausbau auf See stark vorangetrieben. Dezentrale Batteriespeicher zur Erhöhung des Eigenverbrauchs entwickeln sich nur schwach und kommen 2030 bei nur 8 % der installierten Photovoltaikleistung zum Einsatz. Der Ausstieg aus der Kohlestromerzeugung ist schon vor dem Jahr 2030 vollzogen. Die nötigen Flexibilitäten werden teilweise über eine stärkere Nutzung der grenzüberschreitenden Netzverbindungen bereitgestellt. In Deutschland trägt ein moderater Zubau von Kurzzeitspeichern zur Flexibilisierung

des Stromsystems bei. Der Ausbau der Übertragungsnetze entspricht mindestens dem genehmigten Netzentwicklungsplan 2030.

Die recht ambitionierten Minderungsziele für die gesamten Treibhausgasemissionen erfordern deutliche Veränderungen im Wärme- und Verkehrssektor. Die Wärmewende wird bis zum Jahr 2030 beschleunigt vorangetrieben. Der Gebäudeenergieverbrauch sinkt deutlich ab. Auch im Entwicklungspfad C erfolgt ein großer Anteil der Wärmeversorgung über Wärmenetze, die zum überwiegenden Anteil an erneuerbare Heizwerke, ggf. mit Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung, angeschlossen sind. Für einen angemessenen Beitrag des Verkehrssektors zum Erreichen der Klimaschutzziele sind jedoch auch noch weitere Entwicklungen notwendig. Durch ein verändertes Mobilitätsverhalten geht die Nutzung von PKW gegenüber dem Jahr 2017 um 11 % zurück, während der Personenverkehr auf der Schiene um mehr als 37 % zunimmt. Weiterhin werden deutliche Effizienzgewinne bei den Fahrzeugen angenommen.



### 3.5. Entwicklungspfad D: Dezentrale Energiewende mit ambitionierten Klimazielen

Im Entwicklungspfad D werden für Deutschland das gleiche CO<sub>2</sub>-Emissionsbudget und das gleiche Ziel für die Treibhausgasminde rung zugrunde gelegt wie in Entwicklungspfad C. Die Minderungs vorgabe entspricht also auch hier den ambitioniertesten bisher ausgearbeiteten Energiewendeszenarien. Der Entwicklungspfad D setzt aber für die Erreichung dieser Ziele vor allem auf die dezentrale, d.h. regionale, Bereitstellung von emissionsarm erzeugter Energie und der benötigten Speicher sowie auf einen besonders hohen Grad an gesellschaftlicher Partizipation bei den Infrastrukturprojekten.

Auch die Entwicklungen der Energieeffizienz bei klassischen Stromanwendungen und der Ausweitung neuer Einsatzgebiete für Strom entspricht den Annahmen in Entwicklungspfad C. Die Stromnachfrage bleibt im Saldo dieser Effekte gegenüber dem Stand des Jahres 2017 etwa konstant. Die erneuerbare Stromerzeugung wird auf 71 % des Bruttostromverbrauchs ausgebaut. Dabei werden, soweit wie technisch möglich, vorrangig die lastnahen Standorte für Windkraft an Land und Photovoltaik genutzt, auch wenn diese höhere Erzeugungskosten aufweisen als andere Standorte. Im Ergebnis führt dies zu einem starken Zubau von Windkraft in den südlichen und westlichen Bundesländern, dessen Akzeptanz in der Bevölkerung nicht als gesichert angenommen werden kann. Bei der Windkraft auf See bleibt die Ausbaurate moderat. Der Eigenverbrauch von erneuerbarem Strom wird 2030 bei einem Viertel der instal-

lierten PV-Leistung mit Hilfe dezentraler Batteriespeicher optimiert. Die aktive Beteiligung der Gesellschaft an der Energiewende äußert sich auch in einem hohen Anteil an Bürgerenergie bei der Erzeugung erneuerbarer Energien. Die Flexibilität des Stromsystems wird vor allem durch einen starken Ausbau an Kurzzeitspeichern im Umfang von 40 GW erhöht. Die verfügbaren Flexibilitäten im Stromsystem (einschließlich Power-to-Heat und Power-to-Gas) werden so eingesetzt, dass die in der jeweiligen Region verfügbare erneuerbare Stromerzeugung möglichst vollständig genutzt wird.

Im Entwicklungspfad D wird davon ausgegangen, dass durch den dezentralen Ansatz trotz des starken Zuwachses an Strom aus erneuerbaren Energieträgern ein Teil des geplanten Netzausbaus vermieden werden kann. Die Übertragungsnetze werden daher entsprechend des genehmigten Netzentwicklungsplans 2030 ausgebaut, jedoch ohne die geplanten HGÜ-Trassen. Trotz der dezentralen Orientierung behält auch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit im Stromsektor ihre Bedeutung. Der Ausbau der grenzüberschreitenden Stromtrassen zu den Nachbarländern folgt dem Referenzszenario des TYNDP 2018. Das Stromsystem in Europa entwickelt sich jedoch hiervon abweichend entsprechend des Szenarios „Distributed Generation“ des TYNDP 2018. Zwar steigt auch hier der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung in Europa auf über 58 % an, der Ausbau erfolgt jedoch deutlich stärker durch verbrauchernah installierte Photovoltaikanlagen anstelle von Windkraftanlagen.



## Übersicht über die vier Entwicklungspfade

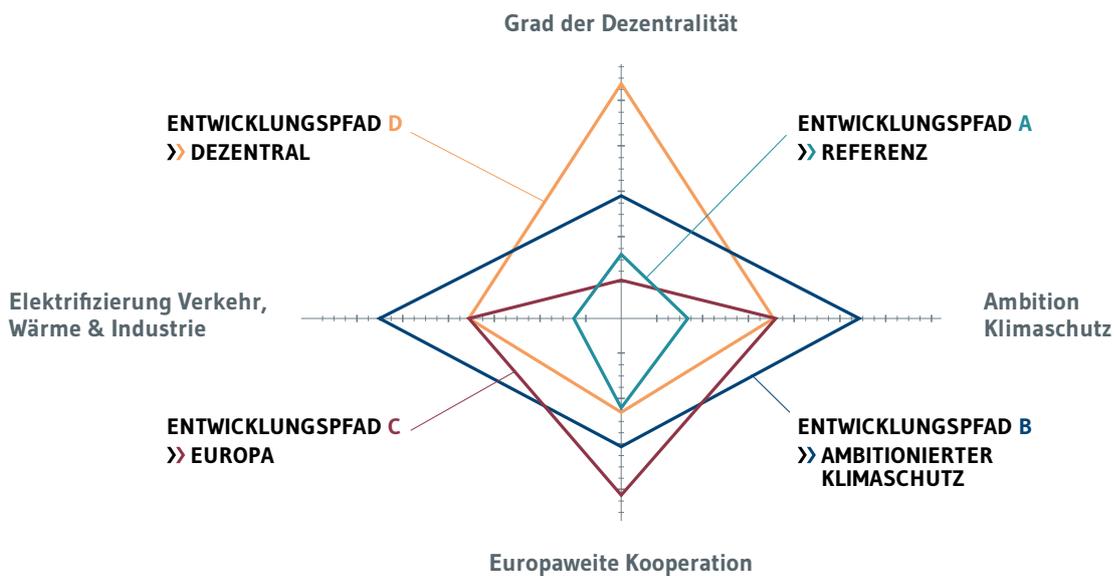


Abbildung 1: Übersicht über die vier Entwicklungspfade

Ähnlich wie in Entwicklungspfad C sind auch hier deutliche Veränderungen im Wärme- und Verkehrssektor erforderlich, um die ambitionierten Minderungsziele für die Treibhausgasemissionen zu erreichen. Im Entwicklungspfad D liegt allerdings der Anteil der direkten Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (z. B. durch Solarthermie oder Biomasse) deutlich höher als im Entwicklungspfad C. Wärmepumpen und Power-to-Heat Anlagen werden vorwiegend im Rahmen dezentraler Nutzungskonzepte von Strom eingesetzt. Die angenommenen Veränderungen im Verkehrssektor entsprechen denen in Entwicklungspfad C.

Das ambitionierte Vorantreiben der Energiewende mit einem zügigem Ausbau von Windkraft und Photovoltaik in der Nähe der Verbrauchsschwerpunkte führt insbesondere in diesen Regionen zu

deutlich stärkeren Flächenkonkurrenzen als in den anderen Entwicklungspfaden, sowohl mit sonstigen Nutzungsformen wie Land- und Forstwirtschaft als auch mit den Belangen von Natur- und Landschaftsschutz.

### 3.6. Die Entwicklungspfade im Vergleich

Vergleicht man die vier Entwicklungspfade, so ist die Ambition beim Klimaschutz im Entwicklungspfad B am größten (Abbildung 1). Es folgen die Entwicklungspfade C und D mit vergleichbar hohem Ambitionsniveau. In Entwicklungspfad A ist die Ambition relativ gesehen am geringsten. Allerdings muss die in diesem Pfad vorgesehene Minderung der Treibhausgasemissionen um 53 % als durchaus anspruchsvoll angesehen werden.

Die anderen Entwicklungspfade gehen hierüber noch hinaus. Die Dezentralität der Energiewende ist im Entwicklungspfad D am deutlichsten ausgeprägt, es folgen die Entwicklungspfade B und A. Der stark auf europäische Integration angelegte Entwicklungspfad C weist zugleich die niedrigste Dezentralität auf. Das Ambitionsniveau bei der Elektrifizierung der Sektoren Verkehr, Wärme und Industrie (Sektorenkopplung) der Entwicklungspfade verhält sich analog wie ihre Ambition beim Klimaschutz, auch hier ist der Entwicklungspfad B am ambitioniertesten.

Betrachtet man die Reduktion der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren, so zeigt sich, dass Minderungspotenziale vor allem im Energiesektor, aber auch in den Sektoren Gebäude und Verkehr erschlossen werden können. Im

Industriesektor werden Einsparungen durch das angenommene Wirtschaftswachstum teilweise aufgehoben. Bei den sonstigen Emittenten, zu denen auch die Land- und Forstwirtschaft gehört, sind die Einsparpotenziale begrenzt (*Abbildung 2*).

Hinter diesen Ergebnissen stehen unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung der Nachfrage nach Endenergie in den einzelnen Sektoren. Auch hier weist Entwicklungspfad B mit 30 % die ambitionierteste Reduktion gegenüber dem Jahr 2017 auf. Dies ist nur durch die sehr ehrgeizige Umstellung auf effiziente Technologien und einer im Vergleich zu den anderen Pfaden geringeren Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Suffizienz) erreichbar. Die Entwicklungspfade C und D sehen einen Rückgang der Endenergienachfrage um 26 % vor, während in der Referenzentwicklung (Entwicklungspfad A) der Rückgang bei 19 % liegt. Die Stromnachfrage bleibt in den Pfaden A, C und D etwa auf dem Niveau des Jahres 2017, während sie im Entwicklungspfad B aufgrund der stärker angenommenen Elektrifizierung von Verkehr, Wärme und Industrie leicht ansteigt.

Wesentlich für die Entwicklung der Treibhausgasemissionen ist zudem der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung. Dies zeigt sich zunächst an der installierten Kraftwerksleistung (*Abbildung 3*). In allen Entwicklungspfaden ist ein deutlicher Ausbau der erneuerbaren Energien notwendig: Bei der Windkraft an Land (onshore) steigt die Leistung gegenüber dem Jahr 2017 in Entwicklungspfad A um 62 % an, im Entwicklungspfad B sogar um 125 %. Bei der Photovoltaik liegt der größte Zuwachs

im dezentral geprägten Entwicklungspfad D: Die installierte Leistung erhöht sich gegenüber dem Jahr 2017 um 276 %. Selbst im Referenzpfad A verdoppelt sich die Leistung der Solaranlagen. Die Leistung der Kohlekraftwerke wurde für diesen Referenzpfad aus dem Szenariorahmen des Netzentwicklungsplans übernommen. In den anderen drei Pfaden werden im Jahr 2030 entweder nur noch sehr wenige oder gar keine Kohlekraftwerke mehr betrieben. Die Differenz zwischen Strombedarf und erneuerbarer Erzeugungsleistung wird durch Erdgaskraftwerke und ggf. auch durch vorübergehende Stromimporte ausgeglichen.

Der starke Ausbau der Windkraft, insbesondere in Entwicklungspfad B, wird zu deutlich verstärkten Konkurrenzen um die verfügbaren Flächen führen. Hierbei geht es zum einen um die als akzeptabel eingeschätzten Abstände zu Wohngebäuden, zum anderen um die Erschließung von Windkraft in Waldgebieten und auf anderweitig genutzten Flächen. Auch bei der Photovoltaik kann es zu Flächenkonkurrenzen kommen, sofern sie nicht überwiegend auf den Dächern von Gebäuden realisiert wird.

Gegenüber dem Jahr 2017 ist die Stromerzeugung in allen vier Entwicklungspfaden rückläufig (*Abbildung 4*), was unter anderem mit den reduzierten Stromexporten in die Nachbarländer zusammenhängt. In allen Entwicklungspfaden wächst die erneuerbare Stromerzeugung deutlich an: Im Referenzpfad A liegt die Zunahme bei 82 % gegenüber dem Jahr 2017, während sie im besonders ambitionierten Entwicklungspfad B um 146 % zunimmt. Die Stromerzeugung aus nicht-erneuerbaren Energiequellen reduziert

## Klimapolitisches Ambitionsniveau der Entwicklungspfade

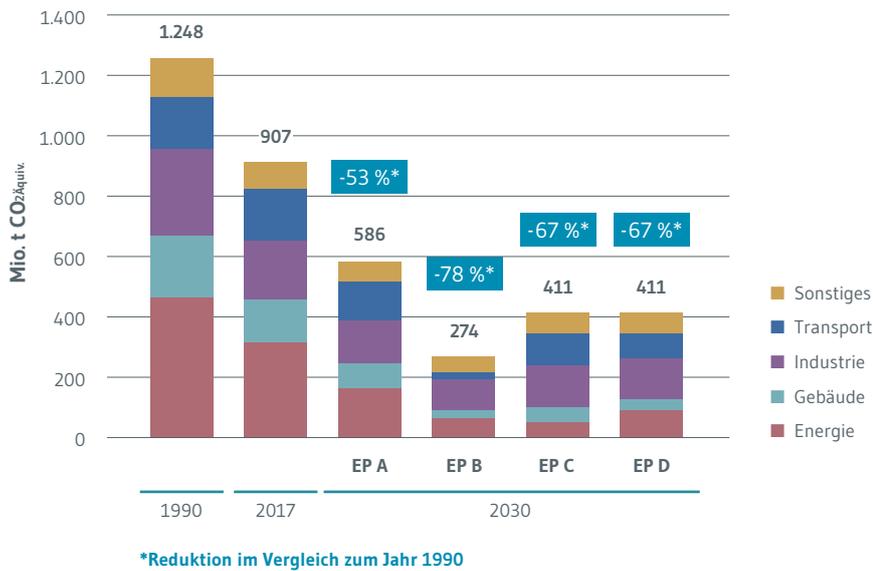


Abbildung 2: Klimapolitisches Ambitionsniveau der Entwicklungspfade // EP: Entwicklungspfad // Quellen: Klimaschutzplan 2050, Deutsches Treibhausgasinventar sowie Berechnungen von EWI und Öko-Institut

## Installierte Leistung der Stromerzeugung

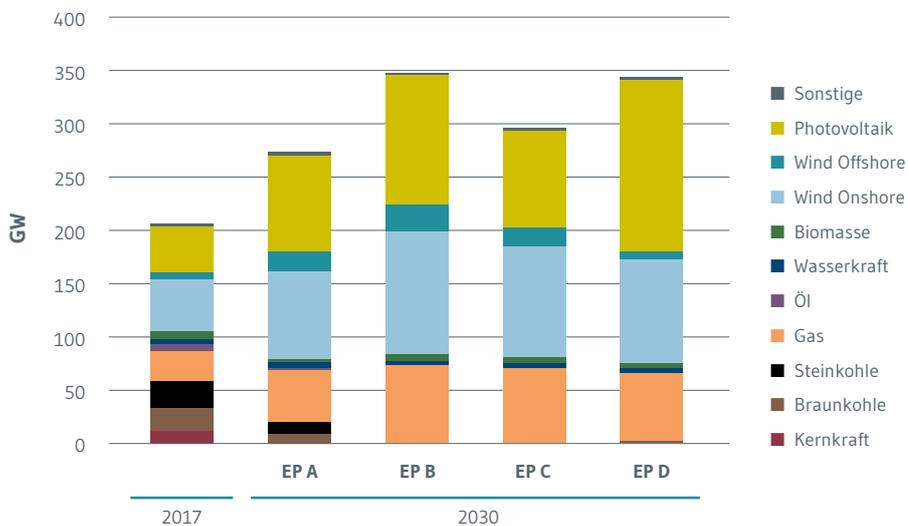


Abbildung 3: Installierte Leistung der Stromerzeugung // EP: Entwicklungspfad // Quellen: Bundesnetzagentur sowie Berechnungen von EWI und Öko-Institut

### Stromerzeugung 2030

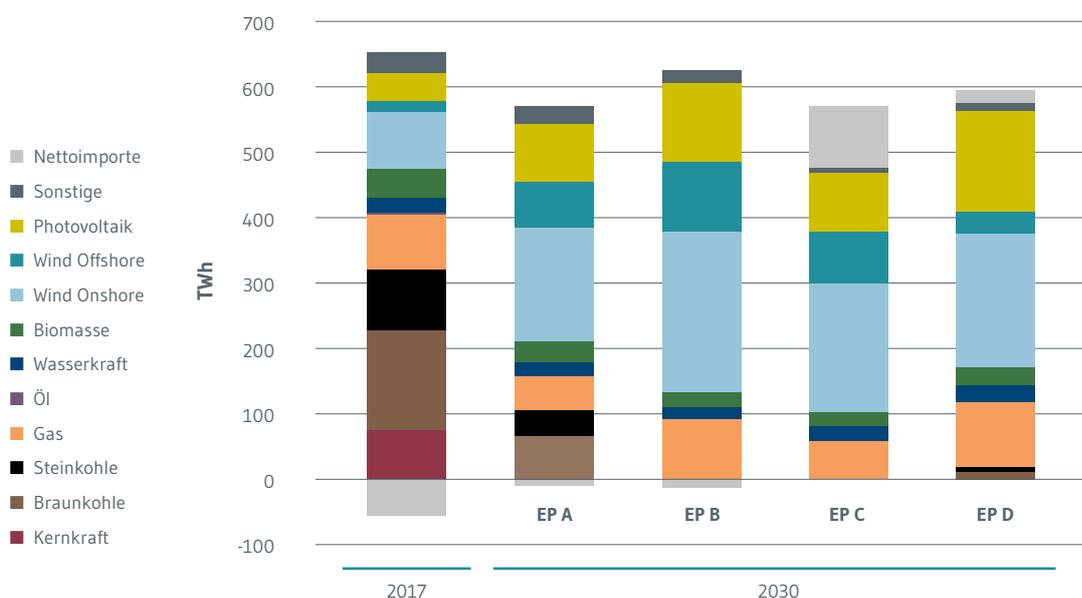


Abbildung 4: Stromerzeugung 2030 // EP: Entwicklungspfad //  
Quellen: AG Energiebilanzen sowie Berechnungen von EWI und Öko-Institut

sich im Referenzpfad A um 57 % gegenüber 2017. Hier spielen die Kohlekraftwerke noch eine bedeutende Rolle gegenüber der Stromerzeugung aus Erdgas. In den anderen drei Entwicklungspfaden erfolgt die nicht-erneuerbare Erzeugung fast ausschließlich aus Gas. In dem durch verstärkte europäische Zusammenarbeit geprägten Entwicklungspfad C geht die nicht-erneuerbare Stromerzeugung sogar um 85 % zurück, dafür kommt es zu Netto-Stromimporten in Höhe von 17 % der inländischen Stromnachfrage.

Um die besonders ambitionierten Klimaschutzziele schnell zu erreichen, werden im Entwicklungspfad B aus Strom erzeugte, synthetische Energieträger im Volumen von 390 TWh benötigt. Dies entspricht etwa 20 % des gesamten

Endenergiebedarfs. Die zur Herstellung dieser Energieträger erforderliche Menge an erneuerbarem Strom kann nicht in Deutschland bereitgestellt werden, daher müssen die synthetischen Energieträger aus dem Ausland importiert werden. Der Einsatz erfolgt vor allem im Verkehrssektor, wo sie in konventionellen Verbrennungsmotoren u.a. im Güterverkehr verwendet werden. Kleinere Anteile gehen in die Sektoren Wärme und Industrie und ersetzen dort Heizöl oder fossiles Gas. Auch im dezentral orientierten Entwicklungspfad D werden synthetische Energieträger eingesetzt. Hier ist das Volumen mit 156 TWh deutlich geringer als im Entwicklungspfad B. Die Entwicklungspfade A und C kommen dagegen mit nur sehr geringen Mengen der strombasierten Energieträger aus.

# DIE NUTZUNG DER ENTWICKLUNGSPFADE IM ENSURE-PROJEKT

## EIN BEISPIEL

Die im Rahmen von ENSURE gewonnenen Erkenntnisse über notwendige Systemstrukturen und Technologien, um die Energiewende umsetzen zu können, sollen in einem geografisch abgegrenzten „Energiekosmos ENSURE“ demonstriert werden. Dies ermöglicht es, neue Erkenntnisse aus ENSURE vergleichsweise schnell zu erproben. Hierbei sollen neue, innovative Elemente und Konzepte für ein Energiesystem der Zukunft in einem realen Stromnetz getestet und genutzt werden. Der Energiekosmos ENSURE soll also zeigen, wie Teile des Energiesystems der Zukunft aussehen: vernetzt – intelligent – effizient – klimafreundlich.

Die Konzeption des Energiekosmos fußt auf den in dieser Broschüre beschriebenen Entwicklungspfaden. Den Ausgangspunkt und die Basis der Konzeption bilden sogenannte Use-Cases, also konkrete Anwendungsfälle eines Umbaus des Energiesystems, die in einem mehrstufigen, iterativen Prozess erarbeitet wurden. Dabei wurden zunächst beschreibende Aussagen der Stakeholder für die Entwicklungspfade, z. B. der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, in Arbeitsfelder, z. B. Digitalisierung oder Sektorenkopplung, übersetzt. Anschließend wurden konkrete zukünftige Herausforderungen der Energienetze identifiziert, z. B. der Aufbau einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur im Rahmen der Digitalisierung.

Die Arbeitsfelder sowie die identifizierten Herausforderungen wurden schließlich miteinander kombiniert und an die Partner des ENSURE-Konsortiums mit der Bitte weitergegeben, entsprechende Vorschläge zur Bewältigung der Herausforderungen zu erarbeiten, zu sammeln und dem Projekt zur Verfügung zu stellen. In der Summe wurden über 100 Beiträge der Konsortiumspartner erfasst und durch eine finale Zuordnung der Vorschläge zu den jeweiligen Herausforderungen mit den eigentlichen Use-Cases zusammengeführt. Diese Use-Cases wurden dann in ein Demonstrationskonzept zum Energiekosmos ENSURE eingearbeitet.



Eine erfolgreiche Energiewende muss viele verschiedene Interessen vereinen. Die Stakeholder haben ihre Präferenzen zu den Entwicklungspfaden offenbart und vier zentrale Ziele sowie mehrere Teilziele definiert.



## 4. DIE SICHT DER STAKEHOLDER

Die vier zuvor dargestellten Entwicklungspfade stellen aus heutiger Sicht plausible Entwicklungen des Energiesystems dar. Dies heißt aber nicht, dass die involvierten Stakeholder tatsächlich alle vier Entwicklungspfade bevorzugen würden. Vielmehr haben sich in den Diskussionen zwischen den Stakeholdern unterschiedliche Präferenzen bezüglich der Entwicklungspfade offenbart. Um diese unterschiedlichen Präferenzen herauszufinden, wurden die Entwicklungspfade durch die beteiligten Stakeholder individuell bewertet.

### 4.1. Ziele der Energiewende

Um die Motivation der unterschiedlichen Präferenzen besser zu verstehen, wurden gemeinsam mit den Stakeholdern zunächst Ziele definiert, die von den Stakeholdern als zentral für die Energiewende angesehen werden:

- Ziel 1:** Beitrag Deutschlands zum Klimawandel reduzieren,
- Ziel 2:** Unmittelbare Auswirkungen der Energieversorgung auf die menschliche Gesundheit und Umwelt in Deutschland reduzieren,
- Ziel 3:** Beitrag des Energiesystems zur ökonomischen Wohlfahrt in Deutschland fördern, und
- Ziel 4:** Zustimmung der Bürger zur Energiewende fördern.

Damit werden zwei umweltbezogene, ein ökonomisches und ein gesellschaftliches Ziel angesprochen.

Die vier Ziele sind recht umfassend, sodass diese für die Bewertung der Entwicklungspfade durch die Stakeholder mit Hilfe von Teilzielen konkretisiert wurden. Auch dieser Schritt erfolgte zusammen mit den Stakeholdern.

Die Ziele setzen sich aus einem oder mehreren Teilzielen zusammen. So wird das Ziel 2 „Unmittelbaren Auswirkungen der Energieversorgung auf die menschliche Gesundheit und Umwelt in Deutsch-

### Ziele und Teilziele für die Energiewende

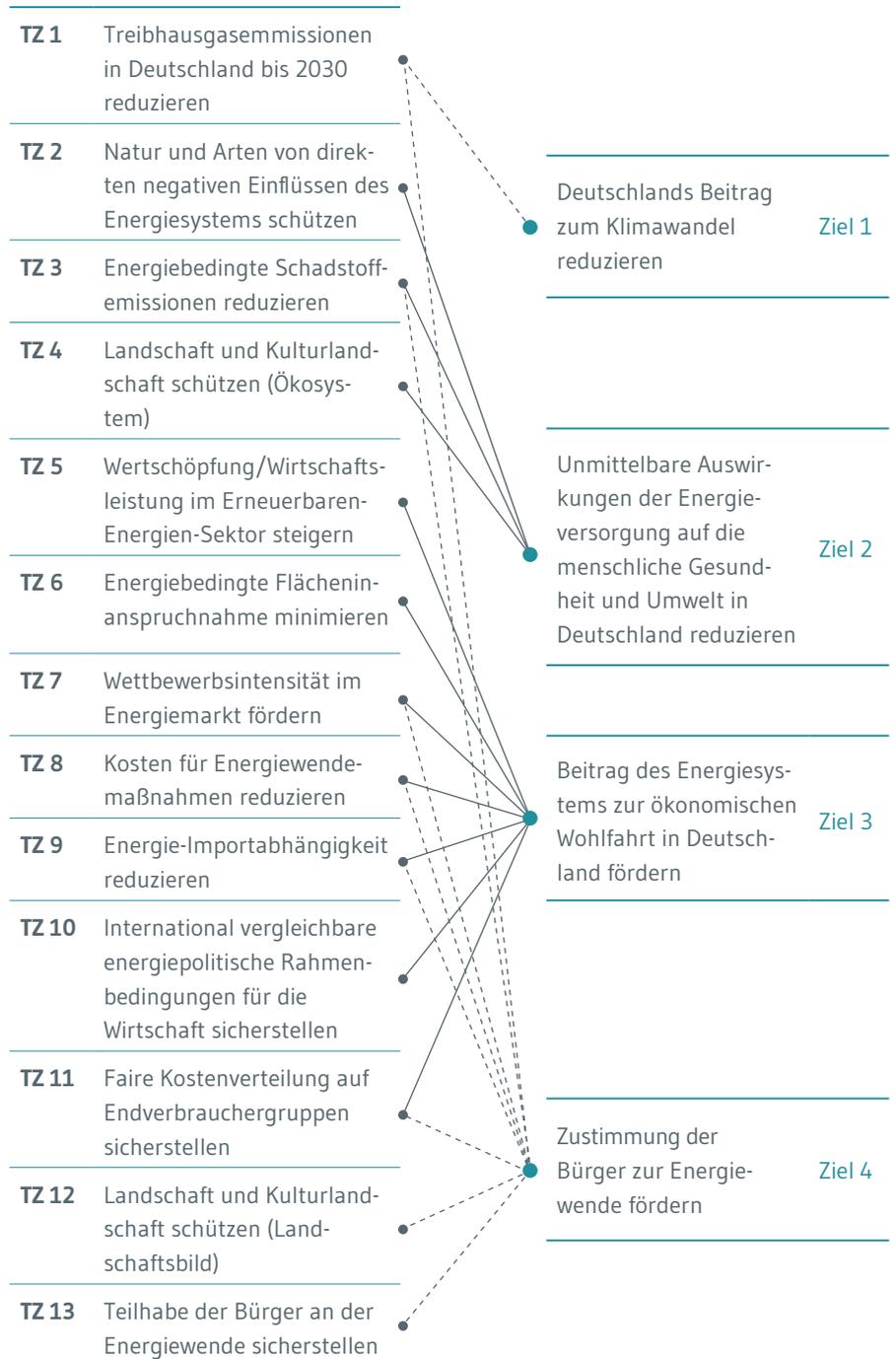


Abbildung 5: Ziele und Teilziele für die Energiewende // Quelle: RWTH Aachen FCN

land reduzieren“ erreicht, wenn die Teilziele „Natur und Arten vor direkten negativen Einflüssen des Energiesystems schützen“ (TZ 2), „Energiebedingte Schadstoffemissionen reduzieren“ (TZ 3) und „Landschaft und Kulturlandschaft schützen (Ökosystem)“ (TZ 4) erfüllt werden (*Abbildung 5*).

Insgesamt wurden 13 Teilziele identifiziert, die einem oder mehreren Ziel(en) zugeordnet wurden (*Abbildung 5*), die wiederum sowohl umweltbezogene, ökonomische als auch gesellschaftliche Aspekte berühren. So beeinflusst das Teilziel 1 „Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2030 reduzieren“ sowohl das Ziel 1 „Beitrag Deutschlands zum Klimawandel reduzieren“ als auch das Ziel 4 „Zustimmung der Bürger zur Energiewende fördern“.

## 4.2. Zielerreichung der Entwicklungspfade

Zur Unterstützung der Bewertung durch die Stakeholder wurde in einem zweiten Schritt für jeden Entwicklungspfad der Zielerfüllungsgrad in jedem Teilziel ermittelt. Der Zielerreichungsgrad gibt an, wie gut ein Entwicklungspfad ein Teilziel erreicht. Hierzu wurden sowohl Ergebnisse aus den Modellberechnungen als auch Literaturdaten verwendet.

Wenig überraschend ergeben sich für die Zielerreichungsgrade auf der Ebene der Teilziele zwischen den einzelnen Entwicklungspfaden teilweise erhebliche Unterschiede (*Abbildung 6*). Die Referenzentwicklung (Entwicklungspfad A) schneidet bei den zwei wirtschaftlichen Teilzielen „Minimierung der

Kosten für Energiewendemaßnahmen“ (TZ 8) und „Sicherstellung international vergleichbarer energiepolitischer Rahmenbedingungen für die Wirtschaft“ (TZ 10) besser ab als die übrigen Entwicklungspfade (*Abbildung 6*). Die Kosten für Energiewendemaßnahmen in Entwicklungspfad A sind relativ niedrig, da vergleichsweise wenige Maßnahmen (z. B. Ausbau erneuerbarer Energien) durchgeführt werden müssen, um die Ziele zur Minderung der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Die hohe Vergleichbarkeit der energiepolitischen Rahmenbedingungen für die Wirtschaft bedeutet, dass die Diskrepanz zwischen den deutschen und den europäischen Klimaschutzziele gering ist und somit verlässliche sowie vergleichbare Wettbewerbs- und Investitionsbedingungen in Europa geschaffen werden. Auf der anderen Seite werden in Entwicklungspfad A im Vergleich zu den anderen Entwicklungspfaden wenig Treibhausgas- und Schadstoffemissionen (TZ 1, TZ 3) reduziert, die Wertschöpfung im Erneuerbaren-Energien-Sektor (TZ 5) relativ wenig gesteigert, die Wettbewerbsintensität im Energiemarkt (TZ 7) nur geringfügig gefördert und die Importabhängigkeit (TZ 9) kaum reduziert. Haupttreiber dieser Entwicklungen sind die vergleichsweise niedrigen Anteile der erneuerbaren Energien und der relativ hohe Anteil konventioneller Kraftwerke an der gesamten Energieversorgung.

Aufgrund der hohen Klimaschutzambitionen und dem damit verbundenen starken Ausbau der erneuerbaren Energien werden in Entwicklungspfad B die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen stark reduziert, die Wertschöpfung im Erneuerbaren-Energien-Sektor gesteigert,

die Wettbewerbsintensität im Energiemarkt verschärft, die Importabhängigkeit stark gesenkt und die Teilhabe der Bürger an der Energiewende gefördert. Die Teilhabe der Bürger beschreibt dabei die organisatorische und finanzielle Beteiligung der Bürger an energiebedingten Infrastrukturmaßnahmen. Auf der anderen Seite bedeutet der starke Ausbau der erneuerbaren Energien, dass das Energiesystem relativ viel Fläche in Anspruch nehmen wird. Dies hat wiederum negative Auswirkungen auf das lokale

Ökosystem, das Landschaftsbild, die Nutzungskonkurrenz mit anderen Flächennutzungsarten und erhöht die negativen Auswirkungen auf Natur und Arten. Unter diesem Aspekt werden die Auswirkungen auf den Vogelzug und die Wanderung von Fledermäusen, Lärmbelastungen, Schattenwurf und die Gefährdung von Vögeln durch Leitungsanflug zusammengefasst. Zudem sind die Kosten für Energiewendemaßnahmen im Vergleich zu den anderen Szenarien vergleichsweise hoch. Die Kosten beziehen sich in diesem Fall

Erfüllungsgrade der Teilziele durch Entwicklungspfade



Abbildung 6: Erfüllungsgrade der Teilziele durch Entwicklungspfade // TZ: Teilziel // Quelle: RWTH Aachen FCN

nur auf den Stromsektor. Zu den Kosten im Stromsektor zählen die Kosten für die Stromerzeugung (sog. Dispatch-Kosten), die Investitionskosten für den Kraftwerkspark und netzbezogene Kosten.

Die Entwicklungspfade C und D wurden so formuliert, dass sie die gleichen Klimaschutzambitionen und damit viele Gemeinsamkeiten in der Verbrauchsstruktur aufweisen. Gleichzeitig unterscheiden sich diese beiden Entwicklungspfade in der Erzeugungsstruktur und in der Einbindung der Bürger in die Energiewende. Entwicklungspfad C fördert, ähnlich wie Entwicklungspfad A, eine zentrale Stromerzeugung und bindet die Bürger im Vergleich zu den Entwicklungspfaden B und D in einem geringeren Maße in den Energiewendeprozess ein. Entwicklungspfad D hingegen betont eine dezentrale Erzeugungsstruktur und setzt, wie Entwicklungspfad B, eine hohe Beteiligung der Bürger am Energiewendeprozess voraus. Während die Entwicklungspfade B und D bei der Steigerung der Wertschöpfung im Bereich der erneuerbaren Energien und der Beteiligung der Bürger an der Energiewende gut abschneiden, benötigen die Entwicklungspfade A und C weniger Fläche für das Energiesystem, was auch zu einer geringeren Belastung des Ökosystems führt. Darüber hinaus sind die Entwicklungspfade A und C mit niedrigeren Kosten für Energiewendemaßnahmen verbunden als die Entwicklungspfade B und D. Das Besondere an Entwicklungspfad D ist, dass bei diesem die organisatorische und finanzielle Beteiligung der Bürger an Energieinfrastrukturprojekten besonders hervorgehoben und eine hohe Eigenstromerzeugung durch die Verbraucher ermöglicht wird. Daher schneidet Entwicklungspfad

D bei der Steigerung der Wertschöpfung im Bereich der erneuerbaren Energien und bei der Beteiligung der Bürger an der Energiewende am besten ab. Der Entwicklungspfad C hingegen hat die geringsten negativen Auswirkungen auf Natur und Arten sowie das Ökosystem und benötigt die geringste Landfläche.

### 4.3. Bewertung der Entwicklungspfade

Inwieweit ein Entwicklungspfad von einem Stakeholder präferiert wird, ergibt sich aus der Kombination von Zielerfüllungsgrad und der Bedeutung der Ziele und Teilziele für den jeweiligen Stakeholder. Die Bedeutung der Teilziele bewerteten die Stakeholder dabei nach dem aus ihrer Sicht bestehenden Einfluss auf die Erreichung des dazugehörigen Ziels. Bei Ziel 2 „Unmittelbare Auswirkungen der Energieversorgung auf die menschliche Gesundheit und Umwelt in Deutschland reduzieren“ haben die Stakeholder beispielsweise festgelegt, wie relevant die drei dazugehörigen Teilziele für die Erfüllung des Ziels sind. Mithilfe individueller Interviews wurde die Wichtigkeit der Ziele und Teilziele für alle Stakeholder individuell ermittelt.

Ebenso legten alle Stakeholder fest, wie wichtig ihnen die vier Ziele für eine erfolgreiche Energiewende sind. Darauf aufbauend konnte eine Gesamtpunktzahl (zwischen 0 und 100) für jeden Entwicklungspfad ermittelt werden. Die Gesamtpunktzahl gibt die Präferenzen der Stakeholder für die einzelnen Entwicklungspfade wieder. Je höher der ermittelte Punktwert für einen Entwicklungspfad ist, desto stärker wird dieser

bevorzugt. *Abbildung 7* zeigt das Ergebnis der individuellen Bewertung der Entwicklungspfade durch die Stakeholder. Die Nummerierung der Stakeholder in *Abbildung 7* dient der Anonymisierung der Ergebnisse und folgt nicht der Auflistung im Kapitel 2.

Die individuelle Bewertung der Entwicklungspfade durch die Stakeholder bestätigt den in den Workshops gewonnenen Eindruck. Die elf Stakeholder weisen bezüglich der Entwicklungspfade unterschiedliche Präferenzen auf, wobei dies nicht nur die Präferenz im Hinblick

auf die einzelnen Entwicklungspfade betrifft, sondern auch für die Bedeutung der Teilziele.

Allerdings lässt sich festhalten, dass zehn von elf Stakeholdern die Referenzentwicklung (Entwicklungspfad A) am wenigsten favorisieren. Alle Stakeholder ziehen mindestens einen anderen Entwicklungspfad dem Entwicklungspfad A vor. Während Entwicklungspfad A generell nicht präferiert wird, gibt es bezüglich der am meisten „bevorzugten“ Variante keine für alle Stakeholder identische Präferenz. Sechs Stakeholder

### Individuelle Bewertung der Entwicklungspfade durch Stakeholder



Abbildung 7: Individuelle Bewertung der Entwicklungspfade durch Stakeholder // Quelle: RWTH Aachen FCN

schätzen den Entwicklungspfad mit dem ambitioniertesten Klimaschutz (Entwicklungspfad B) am höchsten ein, vier bevorzugen eine stärker europäisch orientierte Energiewende (Entwicklungspfad C), während bei einem keine eindeutige Präferenz zwischen den beiden Pfaden erkennbar ist. Auffallend ist weiterhin, dass eine europäisch orientierte Energiewende von allen Stakeholdern gegenüber einer dezentralen Energiewende (Entwicklungspfad D) höher eingeschätzt wird. Diese Präferenz für den Entwicklungspfad C ist aber bei acht Stakeholdern nicht sehr ausgeprägt.

Betrachtet man die individuellen Bewertungen, so kann man drei Gruppen von Stakeholdern unterscheiden. Die erste Gruppe (Stakeholder 1–4) bevorzugt klar den Entwicklungspfad B. Die zweite Gruppe (Stakeholder 5–8) ist mehr oder weniger indifferent zwischen dem Entwicklungspfad B und dem Entwicklungspfad C. Gruppe drei (Stakeholder 9–11) dagegen präferiert den Entwicklungspfad C.

Für die Stakeholder 1–4 ist das Ziel, Deutschlands Beitrag zum Klimawandel zu reduzieren (Ziel 1), zentrales Motiv für deren Unterstützung der Energiewende. Dahingegen steht den Stakeholdern 5–8 der Beitrag des Energiesystems zur ökonomischen Wohlfahrt (Ziel 3) im Vordergrund. Für beide Gruppen ist aber auch die Zustimmung der Bürger zu Energiewende (Ziel 4) sehr wichtig. Tatsächlich unterscheiden sich beide Gruppen auch darin, dass für die Stakeholder 1–4 lokale umweltbezogene Effekte (Ziel 2), die durch das Energiesystem induziert werden sowie die Auswirkungen auf die

wirtschaftliche Wohlfahrt (Ziel 3) eine untergeordnete Rolle spielen, während für die Stakeholder 5–8 beide Ziele eine vergleichsweise hohe Relevanz besitzen.

Eine zu den Stakeholdern 5–8 vergleichbar hohe Priorität des Ziels 3 weisen ebenfalls die Stakeholder 9–11 auf. Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen liegt in der Relevanz des Ziels 2. Für die Stakeholder 9–11 ist die Reduktion der unmittelbaren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und Umwelt (Ziel 2) entscheidend wichtiger als für die Stakeholder 5–8, die die Zustimmung der Bürger zur Energiewende (Ziel 4) als zweitwichtigstes Motiv ansehen.

Die verschiedenen Vorstellungen der Stakeholder bezüglich der Energiewende spiegeln sich nicht nur in den unterschiedlichen Gewichtungen der Ziele, sondern auch in der Bewertung des Einflusses der Teilziele auf die Ziele wider (*Tabelle 1*). Für die Stakeholder 1–4 und 5–8 ist in Bezug auf die Reduktion der unmittelbaren Auswirkungen der Energieversorgung auf die menschliche Gesundheit und Umwelt (Ziel 2) die Verminderung der energiebedingten Schadstoffe (TZ 3) sehr wichtig, während für die Stakeholder 9–11 der Flächenverbrauch (TZ 4) eine vergleichsweise größere Relevanz besitzt.

Kaum Übereinstimmungen bestehen zwischen den drei Gruppen bezüglich der Bedeutung der einzelnen Teilziele für den Beitrag des Energiesystems zur ökonomischen Wohlfahrt (Ziel 3). Die Stakeholder 1–4 sehen die Verminderung der Importabhängigkeit (TZ 9) als wichtig an, während die Stakeholder 5–8 die

Präferierte Teilziele differenziert nach Stakeholdergruppen

	Gruppe 1   Stakeholder 1–4	Gruppe 2   Stakeholder 5–8	Gruppe 3   Stakeholder 9–11
<p>Das <b>Ziel 1</b> besteht nur aus einem Teilziel (Abbildung 5). Daher wird es in dieser Tabelle nicht weiter berücksichtigt.</p>			
<p><b>Ziel 2:</b> Unmittelbare Auswirkungen der Energieversorgung auf die menschliche Gesundheit und Umwelt in Deutschland reduzieren</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energiebedingte Schadstoffemissionen reduzieren (TZ 3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energiebedingte Schadstoffemissionen reduzieren (TZ 3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Landschaft und Kulturlandschaft schützen (Flächenverbrauch) (TZ 4)</li> </ul>
<p><b>Ziel 3:</b> Beitrag des Energiesystems zur ökonomischen Wohlfahrt in Deutschland fördern</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energie-Importabhängigkeit reduzieren (TZ 9)</li> <li>- Kosten für Energiewendemaßnahmen reduzieren (TZ 8)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wertschöpfung/Wirtschaftsleistung im Erneuerbaren-Energien-Sektor steigern (TZ 6)</li> <li>- Kosten für Energiewendemaßnahmen reduzieren (TZ 8)</li> <li>- Faire Kostenverteilung auf Endverbrauchergruppen sicherstellen (Kleinverbraucher entlasten) (TZ 11)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- International vergleichbare energiepolitische Rahmenbedingungen für die Wirtschaft sicherstellen (TZ 10)</li> <li>- Faire Kostenverteilung auf Endverbrauchergruppen sicherstellen (Großverbraucher entlasten) (TZ 11)</li> </ul>
<p><b>Ziel 4:</b> Zustimmung der Bürger zur Energiewende fördern</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teilhabe der Bürger an der Energiewende sicherstellen (TZ 13)</li> <li>- Kosten für Energiewendemaßnahmen reduzieren (TZ 8)</li> <li>- Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2030 reduzieren (TZ 1)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Landschaft und Kulturlandschaft schützen (Landschaftsbild) (TZ 12)</li> <li>- Teilhabe der Bürger an der Energiewende sicherstellen (TZ 13)</li> <li>- Faire Kostenverteilung auf Endverbrauchergruppen sicherstellen (Kleinverbraucher entlasten) (TZ 11)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Landschaft und Kulturlandschaft schützen (Landschaftsbild) (TZ 12)</li> <li>- Teilhabe der Bürger an der Energiewende sicherstellen (TZ 13)</li> </ul>

Tabelle 1: Präferierte Teilziele differenziert nach Stakeholdergruppen

Stärkung der inländischen Wertschöpfung (TZ 6) bevorzugen. Die Stakeholder 9–11 wiederum setzen auf die Sicherstellung von international vergleichbaren energiepolitischen Rahmenbedingungen (TZ 10), damit die Energiewende einen Beitrag zur ökonomischen Wohlfahrt leisten kann. Die Stakeholder 1–4 und 5–8 sehen die Kosten für Energiewendemaßnahmen als relativ wichtig an. Für Stakeholder 9–11 spielt dieser Aspekt eher keine Rolle.

Bei dem Ziel, die Zustimmung der Bürger zur Energiewende zu fördern (Ziel 4), ergeben sich zwischen den Gruppen einerseits Überschneidungen, andererseits aber auch nennenswerte Unterschiede bei der Bewertung der Relevanz der Teilziele. Für die Stakeholder 5–8 und 9–11 ist der Schutz des Landschaftsbilds (TZ 12) wichtiger als die Teilhabe der Bürger an der Energiewende (TZ 13). Diese wiederum ist zentral für die Stakeholder 1–4.

Die Bewertungen der Stakeholder weisen darauf hin, dass eine erfolgreiche Energiewende alle vier genannten Ziele berücksichtigen muss. Obwohl es bei der Gewichtung der Ziele und bei der Einschätzung, wie diese Ziele am besten erreicht werden können, Unterschiede gibt, lässt sich dennoch ein Grundkonsens unter den Stakeholdern finden. So sollten die Bürger stärker an der Energiewende beteiligt werden, um deren Zustimmung zu erhöhen. Auf der anderen Seite sind die Stakeholder der Ansicht, dass der Schutz von Natur und Arten vor direkten negativen Auswirkungen des Energiesystems, wie z. B. negative Auswirkungen auf die Vogel- und Fledermauswanderung

oder Lärmbelastung, eine vergleichsweise geringe Relevanz für den Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt (Ziel 2) hat. Eine weitere Gemeinsamkeit unter den Gruppen besteht darin, dass die Förderung der Wettbewerbsintensität auf dem Energiemarkt weder als zuträglich für die wirtschaftliche Wohlfahrt noch für die Zustimmung der Bürger zur Energiewende angesehen wird.

Eine erfolgreiche Energiewende sollte daher die Beteiligung der Bürger an Infrastrukturprojekten fördern, gut mit internationalen Partnern abgestimmt sein, die Auswirkungen auf das Landschaftsbild begrenzen und die Treibhausgas- und Schadstoffemissionen stark reduzieren.



Das ENSURE-Projekt präsentiert mit den dargestellten Entwicklungspfaden plausible Beschreibungen der Energiesysteme bis 2030. Zukünftig sollen die Überlegungen bis ins Jahr 2050 ausgedehnt werden.





## 5. FAZIT UND AUSBLICK

Die dargestellten Entwicklungspfade sind aus heutiger Sicht plausible Beschreibungen zukünftiger Energiesysteme. Auch wenn die Entwicklungspfade damit zunächst nur hypothetische Konstrukte darstellen, können sie wesentlich werden, wenn diese in gesellschaftliche Entscheidungen, aber auch in Entscheidungen zur Entwicklung von relevanten Technologien, einfließen.

In der vorliegenden Broschüre wurde damit „nur“ eine Bandbreite von möglichen, aber nicht allen möglichen Entwicklungen des Energiesystems bis 2030 dargestellt. Tatsächlich basiert die Auswahl der Entwicklungspfade auf einer Diskussion der Stakeholder, welche Maßnahmen zu einer Begrenzung des Klimawandels beitragen können. Die Bandbreite und noch mehr die Bewertung der Entwicklungspfade durch die Stakeholder sowie die Berücksichtigung des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung verdeutlichen aber auch, dass es hier unterschiedliche Ansichten in der Gesellschaft bzw. zwischen den Stakeholdern gibt.

Mit dem Entwicklungspfad B haben sechs Stakeholder einem bezüglich der Klimapolitik sehr ambitionierten Treibhausgasreduktionsziel den Vorzug gegeben. Die Diskussionen um diesen Entwicklungspfad wurden stark durch

Veröffentlichungen des Weltklimarates der Vereinten Nationen beeinflusst. In diesen wird die Notwendigkeit einer massiven Einschränkung der globalen Treibhausgasemissionen immer wieder unterstrichen, um den Temperaturanstieg auf nahe 1,5 °C zu halten. Das heißt, auch dieser sehr ambitionierte Entwicklungspfad wird den Klimawandel nicht verhindern, könnte aber voraussichtlich dazu beitragen, ihn zu begrenzen. Die Radikalität des Pfades lässt nach heutigem Wissensstand eine Diskussion über das Ausmaß der Zentralität oder Dezentralität des Energiesystems letztendlich nicht zu. Vielmehr müssen zu seiner Realisierung alle verfügbaren Potenziale zur Reduktion der Treibhausgasemissionen genutzt werden. Folglich impliziert dieser Entwicklungspfad eine dramatische Beschleunigung der Modernisierung der nationalen Volkswirtschaft, die nicht nur die Energiewirtschaft betrifft, sondern auch (und insbesondere) den Verkehr und den Gebäudebestand. Auch die Industrie spielt eine wichtige Rolle. Dies gilt zudem sowohl für das Übertragungsnetz als auch für die Verteilnetze für Strom, die nicht nur umfassend ausgebaut, sondern auch IT-seitig ertüchtigt werden müssen. Letzteres ist eine unabdingbare Voraussetzung, um die zunehmende Komplexität des Energiesystems auch zukünftig beherrschen zu können.

Die Entwicklungspfade C und D sind zwar ein Stück weniger ambitioniert, sie orientieren sich aber immer noch an einem 95 %-Reduktionspfad für die Treibhausgasemissionen. Das verminderte Ambitionsniveau lässt im Vergleich zu Entwicklungspfad B aber die Frage zu, ob die zukünftige Energiebereitstellung eher zentral oder eher dezentral organisiert werden soll. Je nachdem ergeben sich bezüglich der Verteilung der installierten Leistung je Stromerzeugungstyp sowie bei dem Mix der eingesetzten Technologien nennenswerte Unterschiede. Eine dezentral orientierte Energiewende (Entwicklungspfad D) weist gegenüber einer stärker europäisch orientierten (Entwicklungspfad C) eine um rund 17 % höhere installierte Gesamtleistung auf, die besonders aus zusätzlichen Photovoltaikanlagen bestehen würde. Allerdings deckt Deutschland im Entwicklungspfad C etwa 17 % der Stromnachfrage durch Nettostromimporte. Weiterhin ist auf dem Entwicklungspfad D mit einem reduzierten Ausbaubedarf im Übertragungsnetz gegenüber den Pfaden A, B und C zu rechnen.

Was aber letztendlich umgesetzt wird, d. h., eher eine Welt, die sich an einem sehr ambitionierten Klimaschutz (Entwicklungspfad B) orientiert, oder an einer stärker europäisch orientierten Energiewende (Entwicklungspfad C) mit etwas niedrigeren Klimaschutzambitionen, oder, als weitere Möglichkeit, einer

dezentralen Energiewende (Entwicklungspfad D) dem Vorzug gibt, ist nicht nur eine technische Frage, sondern auch das Ergebnis gesellschaftlicher Diskussionen und politischer sowie privater Entscheidungen. Nicht nur gesetzliche Rahmensetzungen für die Energiebereitstellung und -nutzung sind relevant, sondern auch persönliche Entscheidungen über die Art und Umfang der Nachfrage nach Energiedienstleistungen (Stichworte: Effizienz und Suffizienz), in Energieanlagen zu investieren oder auch Energieanlagen im eigenen Lebensraum zu akzeptieren.

Im Rahmen der Bewertung der Entwicklungspfade durch die Stakeholder wurden die Entwicklungspfade B sowie C präferiert. Dem gegenüber wird der Entwicklungspfad A durch die Stakeholder fast durchgängig als am wenigsten erstrebenswert angesehen. Aber eine nähere Betrachtung dieses Pfades ist aus zwei Gründen wichtig. Einerseits ist dieser Entwicklungspfad kompatibel zum aktuellen Klimaschutzplan der Bundesregierung. Andererseits ist schon dieser Entwicklungspfad recht ambitioniert, wenn man die historische Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland seit 1990 betrachtet. Der Entwicklungspfad A bedeutet eine Verdopplung der aktuellen „Reduktionsgeschwindigkeit“ bei den Emissionen. Seit 2000 wurde die notwendige Emissionsverminderung des Kohlenstoffdioxids nur



einmal im Zusammenhang mit der Wirtschaftskrise im Jahr 2008 erreicht. Um allein den Entwicklungspfad A zu erreichen, müssten die Treibhausgasemissionen jährlich vergleichbar vermindert werden, aber ohne die gesellschaftlichen und ökonomischen Kosten, die sich 2008 und in den folgenden Jahren ergaben.

Alle vier Entwicklungspfade verlangen eine rasche Modernisierung der Volkswirtschaft, wobei nicht nur die Erzeugung von Energie betroffen ist. Das „neue“ Energiesystem verlangt eine hohe Flexibilität nicht nur bei der Bereitstellung, sondern gerade auch auf der Nachfrageseite, die auch private Haushalte betrifft. Als relativ sicher gilt, dass zur Steuerung der Energiebereitstellung umfassende Informationen über das Nachfrageverhalten (und deren Beeinflussung) auch von privaten Haushalten notwendig sind. Unklar ist aber noch, wie die Informationsflüsse den Anbietern ohne relevante Eingriffe in die Persönlichkeitsrechte der Nachfrager gesichert zur Verfügung gestellt werden können.

Ebenso sind auch umfassende Maßnahmen im Verkehrs- und im Gebäudesektor notwendig. Da Maßnahmen gerade in diesen beiden Sektoren unmittelbar in den persönlichen Lebensbereich eingreifen (müssen), ist die Einbindung der Gesellschaft bei der Ausgestaltung der gesetzlichen Regelungen besonders wichtig.

Darüber hinaus muss auch die Industrie entsprechende Investitionen durchführen.

Die Unterschiede zwischen den Entwicklungspfaden sind sicherlich in der notwendigen „Geschwindigkeit“ der Transformation zu sehen. Damit verbunden ist die Frage nach der Reihenfolge, in denen notwendige Maßnahmen umgesetzt werden müssten. Diese Reihenfolge wird sich unmittelbar auf die Ausgestaltung des Netzsystems auswirken. So wird eine forcierte Elektrifizierung des Verkehrs andere Implikationen auf das Netz haben als eine forcierte Sanierung von Gebäuden. Wenn man aber den Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung als Maßgabe für das zukünftige staatliche Handeln nimmt, so ist der Entwicklungspfad A letztendlich nur ein Zwischenstopp zu einem mit den Entwicklungspfaden C und D (möglicherweise auch mit Entwicklungspfad B) kompatiblen Pfad zu sehen. Auch in Bezug auf die Anforderungen für die Stromnetze unterscheiden sich die hier betrachteten Entwicklungspfade daher vor allem in der Geschwindigkeit der notwendigen Änderungen, nicht unbedingt in ihrer grundsätzlichen Richtung.

Die Diskussion um zukünftige Energiesysteme entsteht immer auch im aktuellen gesellschaftlichen und technischen Kontext. Das heißt, Entwicklungen in der Gesellschaft und Politik, aber auch technologischer Fortschritt können dazu

führen, dass die in dieser Broschüre dargestellten Entwicklungspfade schon in naher Zukunft nicht mehr den aktuellen Wissensstand widerspiegeln. Daher sollen die Entwicklungspfade im weiteren Verlauf des ENSURE-Projektes regelmäßig aktualisiert werden. Da aber das bisherige Zieljahr 2030 „quasi schon übermorgen“ erreicht wird, ist es natürlich auch wichtig, den Zeithorizont zu erweitern. Der zukünftig im ENSURE-Projekt betrachtete Zeithorizont wird daher bis zum Jahr 2050 ausgedehnt.

Über die Ergebnisse der Aktualisierung im weiteren Verlauf des ENSURE-Projektes (sofern die Anschlussförderung bewilligt wird) informiert die Kopernikus-Webseite unter:

<https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/neue-netzstrukturen>.





## **Herausgeber**

Schleswig-Holstein Netz AG  
Schleswig-HeinGas-Platz 1  
25451 Quickborn  
[www.sh-netz.com](http://www.sh-netz.com)

Kontakt

E-Mail: [ensure@sh-netz.com](mailto:ensure@sh-netz.com)

## **Bildnachweis**

metamorworks (1), xiaoliangge (2),  
archimede (4), Viacheslav Iakobchuk (8),  
Blue Planet Studio (10), Laura Pashkevich  
(11), Andrei Merkulov (12), Forenius (14),  
Krailas (18), chungking (23), stock-  
solutions (24), Calado (34), Petair (35),  
rh2010 (37), boonchok (38)  
[/stock.adobe.com](https://stock.adobe.com)

## **Layout**

LOCKVOGEL – Werbenest Hamburg  
Hütten 82, 20355 Hamburg  
[www.lockvogel-hamburg.de](http://www.lockvogel-hamburg.de)

## **Druck**

DIE PRINTUR GmbH  
Boschstraße 2, 24568 Kaltenkirchen

Stand: Dezember 2019

Die in dieser Broschüre geäußerten  
Meinungen sind die Meinungen der  
Autoren und spiegeln nicht zwangsläufig  
die Meinung des Herausgebers wider.

INVOLVIERTE PROJEKTPARTNER

---



FCN | Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior  
Chair of Energy Economics and Management | Prof. Dr. Reinhard Madlener



(SPONSOR)



(SPONSOR)