



Ariadne-Report – Zusammenfassung

Die Energiewende
kosteneffizient gestalten:
Szenarien zur
Klimaneutralität 2045

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Autorinnen und Autoren

Koordination und Leitung

Gunnar Luderer (PIK)
Frederike Bartels (PIK)
Tom Brown (TUB)

Gesamtsystem und übergreifende

Analysen

Gunnar Luderer (PIK)
Frederike Bartels (PIK)
Felix Schreyer (PIK)
Dominika Sörgel (PIK)
Robin Hasse (PIK)
Johanna Hoppe (PIK)
Robert Pietzcker (PIK)
Philipp C. Verpoort (PIK)

Verkehrssektor

Till Gnann (Fhg-ISI)
Daniel Speth (Fhg-ISI)
Fabio Frank (Fhg-ISI)
Michael Krail (Fhg-ISI)
Clara Aulich (Fhg-ISI)
Patrick Plötz (Fhg-ISI)

Gebäudewärme

Hannah Nolte (Fhg-ISE)
Christoph Kost (FHG-ISE)
Charlotte Senkpiel (Fhg-ISE)
Sebastian Herkel (Fhg-ISE)

Industrie

Matthias Rehfeldt (Fhg-ISI)
Andrea Herbst (Fhg-ISI)
Tobias Fleiter (Fhg-ISI)
Marius Neuwirth (Fhg-ISI)

Energiewirtschaft und Infrastruktur

Tom Brown (TUB)
Michael Lindner (TUB)
Norman Gerhardt (Fhg-IEE)
Toni Seibold (TUB)
Julian Geis (TUB)
Helen Ganal (Fhg-IEE)

Staatliche Finanzierung (Box)

Alyssa Gunnemann (ETH)
Bjarne Steffen (ETH)

Datenanalyse und Visualisierung

Falk Benke (PIK)

Beteiligte Institute:

PIK: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

TUB: Technische Universität Berlin

Fhg-ISI: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung

Fhg-ISE: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

Fhg-IEE: Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik

ETH: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Dieses Dokument ist nur ein Auszug aus dem Ariadne Szenarienreport 2025. Den vollständigen Report finden Sie hier <https://ariadneprojekt.de/publikation/report-szenarien-zur-klimaneutralitaet-2045/>.

Für Ihre Unterstützung bei der Erstellung dieses Berichts, während des Reviews und beim finalen Layout bedanken sich die Autoren sehr herzlich bei Ann-Katrin Schenk, Ottmar Edenhofer, Michèle Knodt, Ulrich Fahl, Christopher Leisinger, Benjamin Pfluger, Falko Ueckerdt, Valentin Preis, Matthias Koch, Stefan Niessen, Max Dauer, Hanno Stagge, Dorothee Ilskens und Nicole Krüger. Großer Dank geht außerdem an alle Modelliererinnen und Modellierer, die mit ihrer kontinuierlichen Arbeit an den verwendeten Modellen die Entwicklung der Szenarien überhaupt möglich machen.

Dieses Papier zitieren:

Gunnar Luderer (Hrsg.), Frederike Bartels (Hrsg.), Tom Brown (Hrsg.), Clara Aulich, Falk Benke, Tobias Fleiter, Fabio Frank, Helen Ganai, Julian Geis, Norman Gerhardt, Till Gnann, Alyssa Gunnemann, Robin Hasse, Andrea Herbst, Sebastian Herkel, Johanna Hoppe, Christoph Kost, Michael Krail, Michael Lindner, Marius Neuwirth, Hannah Nolte, Robert Pietzcker, Patrick Plötz, Matthias Rehfeldt, Felix Schreyer, Toni Seibold, Charlotte Senkpiel, Dominika Sörgel, Daniel Speth, Bjarne Steffen, Philipp C. Verpoort (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.
<https://doi.org/10.48485/pik.2025.003>

Kontakt zu den Autorinnen und Autoren: Gunnar Luderer, luderer@pik-potsdam.de

Der vorliegende Ariadne-Report wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Er spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

März 2025

Bildnachweis

Titel: mimadeo / Adobe Stock; Kapitel 2: Guillaume / Adobe Stock; Kapitel 3: eye-tronic / Adobe Stock; Kapitel 4: Ingo Bartsch / Adobe Stock ; Kapitel 5 sanderstock / Adobe Stock; Kapitel 6: Patboon / Adobe Stock; Kapitel 7: 安琦王 / Adobe Stock

ZUSAMMENFASSUNG

Der Klimawandel schreitet voran.

Das Jahr 2024 hat zwei neue Rekorde aufgestellt: die globale Mitteltemperatur lag erstmals +1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau (Copernicus Climate Change Service 2024) und die globalen CO₂-Emissionen erreichten einen neuen Höchststand (Global Carbon Project 2024).

Die deutsche Energiewende zeigt deutliche Fortschritte.

Deutschland hat seine Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) im Jahr 2024 gegenüber 1990 fast halbiert (Agora Energiewende 2025). Zudem stammten 2024 mehr als 60 % der öffentlichen Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Quellen, und es wurde so wenig Strom aus Kohle erzeugt wie zuletzt in den 1950er Jahren (Burger 2025). Das liegt hauptsächlich am seit 2022 beschleunigten Ausbau der Solarenergie und dem laufenden Ausstieg aus der Kohleverstromung.

Gebäude, Verkehr und Industrie müssen jetzt schnell elektrifiziert und dekarbonisiert werden.

Zum Erreichen des deutschen Emissionsminderungsziels für 2030 und der Klimaneutralität bis 2045 muss die weitgehende Elektrifizierung der Gebäudewärme sowie des Verkehrssektors gelingen und schließlich die Industrie nahezu CO₂-neutral produzieren.

Der vorliegende Ariadne-Szenariereport spannt den Optionenraum für die deutsche Energiewende auf. Dazu werden fünf Szenarien modelliert, die Klima-

ziele und Klimaneutralität erreichen: Drei Szenarien mit unterschiedlichem Technologiefokus (*Fokus Strom*, *Fokus Wasserstoff*, *Technologiemix*) illustrieren den Möglichkeitsraum zwischen direkter Elektrifizierung (direkter Nutzung von Strom) und indirekter Elektrifizierung (Nutzung von elektrolytischem Wasserstoff und Derivaten). Zwei Szenarien mit variierender Nachfrage (*Niedrige Nachfrage* und *Hohe Nachfrage*) zeigen, welche Effekte eine beschleunigte beziehungsweise schleppende Transformation der Endnutzungssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr hat. Ein sechstes Szenario *Existierende Politiken* bildet nur bereits implementierte Klimapolitiken ab und zeigt, dass so das Ziel der Klimaneutralität 2045 verfehlt wird. Die Szenarien sind im Modellvergleich aus fünf Gesamtsystem- und Sektormodellen entstanden.

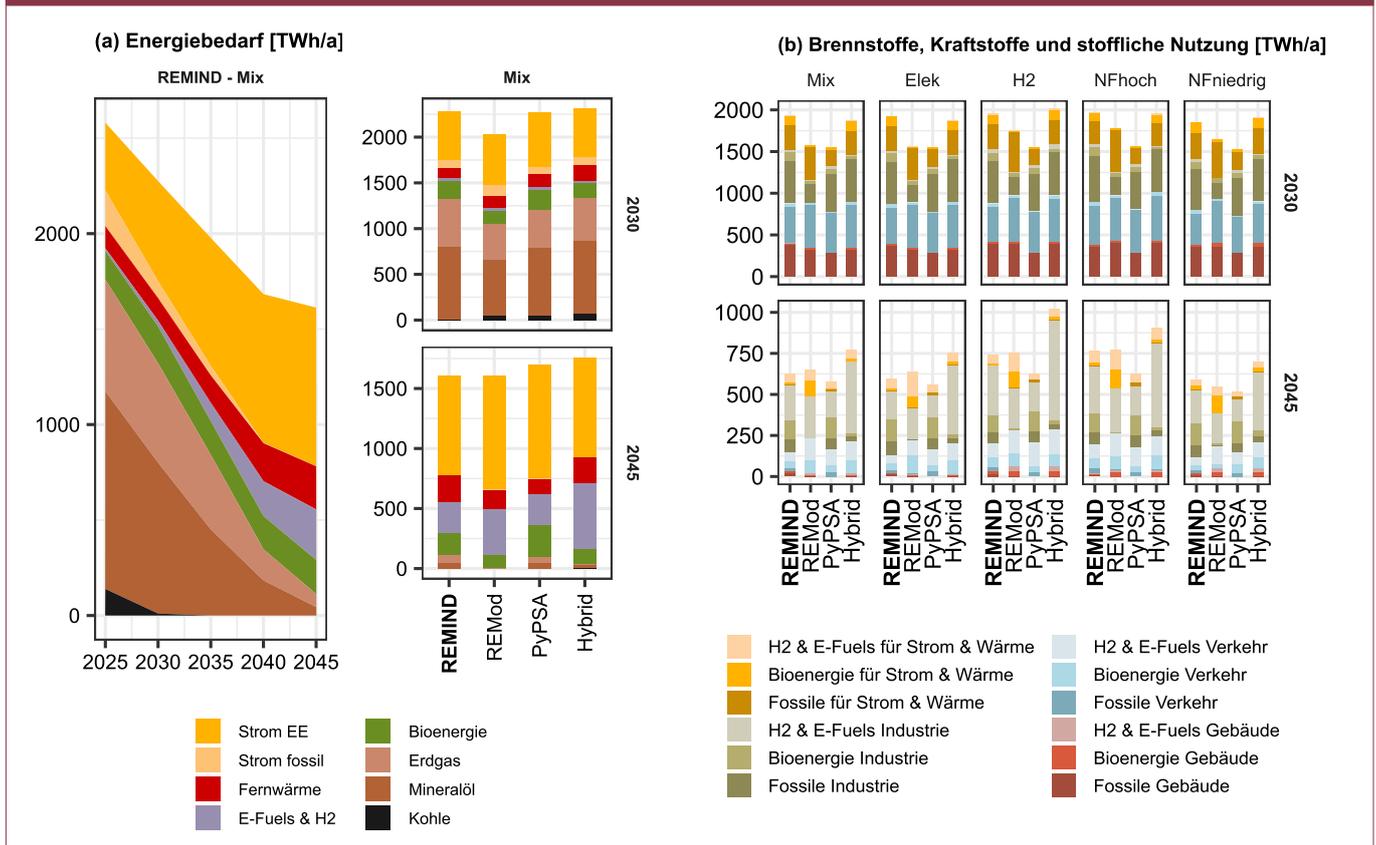
Z.1 Energiesystemtransformation

Die Stromerzeugung wird in allen Zielszenarien bis 2030 weitgehend und bis 2035 nahezu vollständig dekarbonisiert

(Abbildung Z.1). Das erfordert den massiven Ausbau von erneuerbarer Stromerzeugung, Stromnetzen und Flexibilitätsoptionen (Speicher, Elektrolyse und intelligentes Lastmanagement durch E-Fahrzeuge, Wärmepumpen und Industrie).

Der Anteil von Wind- und Solarenergie am Strommix steigt auf 84–91 % in 2035 (Kapitel 2.2, Szenario *Technologiemix*). Insgesamt kommt es somit unge-

Abbildung Z.1: Gesamter Energiebedarf und Energiebedarf an Brennstoffen, Kraftstoffen und für stoffliche Nutzung, jeweils nach Energieträgern.



(a) Energiebedarf nach Energieträgern (inklusive stofflichem Bedarf der Industrie und Bedarf für internationalen Flug- und Schiffsverkehr), (b) Energiebedarf an Brennstoffen, Kraftstoffen und für stoffliche Nutzung (in der Industrie und der Back-up-Stromerzeugung) nach Energieträger und Einsatz. Verkehr enthält auch den Energiebedarf des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs.

fähr zu einer Verdreifachung der Wind- und Solarstromerzeugung bis 2030 gegenüber 2020. Besonders Wind spielt hier wegen seines günstigen saisonalen Erzeugungsprofils eine wichtige Rolle.

Mehr Flexibilität im Stromsystem ist eine wichtige Voraussetzung für mehr erneuerbare Stromerzeugung (Kapitel 6.1.3). Ein Großteil der Flexibilität (insbesondere über Zeiträume von Tagen und Wochen) wird durch Stromspeicher (vor allem stationäre Batteriespeicher, aber auch Pumpspeicherkraftwerke), das Laden batterieelektrischer Fahrzeuge und den Stromhandel mit europäischen Nachbarländern bereitgestellt. Die Entladekapazität von Stromspeichern steigt auf 50 GW bei 435 GWh Speicherkapazität im Jahr 2045. Flexible Nachfrage von Wärmepumpen und in der Industrie können ebenfalls einen kleinen Beitrag zur flexiblen Nachfrage leisten. Langfristige industrielle Flexibilitätskapazitäten über Zeiträume von 5–15 Minuten können

5–9 GW betragen (SynErgie 2024a). Backup-Kraftwerke im Umfang von 90 GW im Jahr 2045 machen ungefähr 5 % der Stromerzeugung aus und leisten damit einen kleinen, aber wichtigen Beitrag zur Flexibilität, insbesondere durch saisonalen Ausgleich der Stromversorgung.

Regionale Strompreise erlauben effiziente Netzplanung und tragen dazu bei, die Strompreise für alle Endkunden in Deutschland zu senken (Kapitel 6.3.4). Eine Unterteilung Deutschlands in mehrere regionale Strompreiszonen ermöglicht eine effiziente, integrierte Netzplanung. Dadurch könnten Endkundenpreise im Jahr 2045 im Durchschnitt um 7,5 EUR/MWh sinken. Gleichzeitig entsteht ein Strompreisgefälle von etwa 10 EUR/MWh vom Süden zum Norden Deutschlands. Im Norden sind die Strompreise aufgrund hoher Stromerzeugung durch Windkraft besonders niedrig.

Die Klimaneutralität von Gebäudewärme, Verkehr und Industrie wird aufgrund der höheren Energie- und Kosteneffizienz überwiegend durch Elektrifizierung erreicht (insbesondere E-Fahrzeuge und Wärmepumpen) (Abbildung Z.1a). Zusammen mit energetischer Gebäudesanierung und material- und rohstoffeffizienter Kreislaufwirtschaft in der Industrie reduziert sich der Energiebedarf um 32–38 % bis 2045 im Vergleich zu 2023 und erleichtert die Transformation deutlich. Insgesamt steigt der Stromanteil am Gesamtenergieverbrauch (inklusive stofflichem Bedarf in der Industrie und internationaler Flug- und Schiffsverkehr) von 17 % im Jahr 2023 auf 47–59 % im Jahr 2045.

Ein Flaschenhals für die Klimaneutralität sind Angebot und Nachfrage für erneuerbare stoffliche Energie („grüne Moleküle“). In den Klimaneutralitätsszenarien sinkt der Bedarf an Brennstoffen,

Kraftstoffen und Rohstoffen auf 515–1.023 TWh im Jahr 2045, maßgeblich für die Grundstoffindustrie, den Flug- und Schiffsverkehr und – in geringerem Umfang – Brennstoffe für die Backup-Stromerzeugung (Abbildung Z.1b).

Biomasse wird nur begrenzt verfügbar bleiben. Daraus entsteht eine anhaltende Notwendigkeit zur weitgehenden direkten Elektrifizierung. Zur Vermeidung von Emissionen in Industrie sowie Flug- und Schiffsverkehr kann Bioenergie mit circa 200 TWh beitragen, muss aber mit Wasserstoff und E-Fuels ergänzt werden, um die Bedarfe grüner Moleküle zu decken (Abbildung Z.1b).

Wasserstoff und E-Fuels bleiben teuer und knapp. Sie werden überwiegend für nicht direkt-elektrifizierbare Energiebedarfe in Teilen der Industrie, im Flug- und Schiffsverkehr sowie für die Backup-Stromerzeugung benötigt. Wasserstoffgestehungskosten belaufen sich laut der Modellergebnisse auf 156 EUR/MWh im Jahr 2030 und 110 EUR/MWh im Jahr 2045.

Deutschland wird im Jahr 2045 auf Importe von 60–250 TWh Wasserstoff und 100–130 TWh E-Fuels angewiesen sein (Kapitel 6.1.2). Das zeigen Modellergebnisse des Szenarios *Technologiemix*. Zum Vergleich: Im Durchschnitt der Jahre 2010–2019 importierte Deutschland 943 TWh Erdgas und 1.041 TWh Rohöl. Insgesamt wird Wasserstoff zu 34–68 % heimisch erzeugt und sonst importiert. E-Fuels werden hingegen überwiegend importiert.

Der Aufbau von Wasserstoff- und CO₂-Infrastruktur sowie der Ausbau der Fernwärme müssen frühzeitig erfolgen (Kapitel 7.2 und 7.3). Die Wasserstoff- und CO₂-Infrastruktur sind Voraussetzung für die Klimaneutralität der Industrie und Fernwärmenetze für klimaneutrale Wärmeerzeugung in dicht besiedelten urbanen Räumen. Je nach Modell und Szenario variiert der Wasserstoffbedarf stark, woraus eine unterschiedliche Größe des benötigten Wasserstoff-Kernetzes resultiert. Laut mancher Modellergebnisse ist der Umfang des im Oktober 2024 von der Bundesnetzagentur beschlossenen Kernetzes (9.040 km Länge, 18,9 Mrd.

EUR Investitionsvolumen) am oberen Ende dessen, was im Jahr 2045 an Wasserstoff-Pipelines für Ferntransportkapazität in Deutschland benötigt wird. Dieses Ergebnis hängt stark davon ab, wie groß die Rolle von Wasserstoff in der Backup-Stromerzeugung sein wird, zu welchem Grad in der Erzeugung von Kunststoffen Wasserstoff oder andere Klimaschutzoptionen eingesetzt werden, und ob erste Verarbeitungsschritte in wasserstoffintensiven Wertschöpfungsketten (Stahl, Ammoniak) in Länder mit besserer Verfügbarkeit von günstigem erneuerbarem Strom verschoben werden (Verpoort et al. 2024b).

Z.2 Investitionen

Der klimaneutrale Umbau des Energiesystems induziert Investitionen von circa 116–131 Mrd. EUR pro Jahr (etwa 3,5 % des BIP 2024) (Abbildung Z.2c). Das zeigen die Modellergebnisse für die Szenarien *Technologiemix*, *Fokus Elektrifizierung* und *Fokus Wasserstoff*, die bis 2045 Klimaneutralität erreichen. Hierbei sind Investitionen in klimafreundliche Technologien in Gebäudewärme, Industrie und Energiewirtschaft, in die Antriebswende sowie Investitionen zur Ermöglichung der Energiewende (z. B. Stromnetze, Ladeinfrastruktur) und sonstige Investitionen, die auf Emissions-

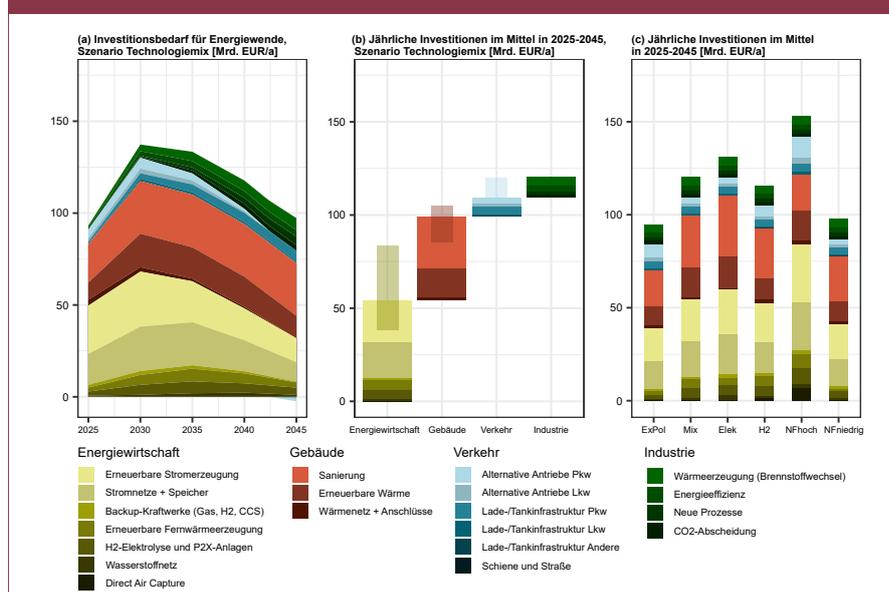
minderung abzielen, berücksichtigt (siehe Kapitel 1.4.2 für eine Definition und Tabelle 1.4 für eine vollständige Liste). Ein Großteil dieser Investitionen (95 Mrd. EUR pro Jahr) wird bereits durch die bis heute beschlossenen Maßnahmen induziert (Szenario *Existierende Politiken*).

Die Wärmewende in Gebäudesektor macht mit 40–50 Mrd. EUR pro Jahr einen großen Anteil der Investitionsbedarfe der Energietransformation aus (Abbildung Z.2c, Technologieszenarien). Vor allem Ausgaben für die energetische Sanierung und, in einem geringeren Umfang, der Einbau klimafreundlicher Heizungssysteme schlagen hier zu Buche.

Die Energiewirtschaft hat mit 52–60 Mrd. EUR pro Jahr ebenfalls einen großen Anteil am Investitionsbedarf für die Energiewende (Abbildung Z.2c, Technologieszenarien). Der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung und die Erhöhung der Stromnetze spielen an dieser Stelle eine wichtige Rolle.

Batterieelektrische Pkw und Lkw erreichen 2030 ein Marktvolumen von 80 Mrd. EUR pro Jahr (Kapitel 3.2). Die Differenzinvestitionen für alternative Antriebe machen nur rund 5–8 Mrd. EUR pro Jahr aus, da die Kosten von E-Fahr-

Abbildung Z.2: Jährlicher Investitionsbedarf für die Energiewende in 2025–2045.



(a) im Szenario *Technologiemix*, (b) im Mittel über die Jahre 2025–2045 je Sektor und mit Bandbreiten über die Szenarien, und (c) je Szenario.

zeugen relativ zu vergleichbaren Verbrennern sinken werden. Hinzu kommen im Verkehrssektor Investitionen in Ladeinfrastruktur in Höhe von 5 Mrd. EUR pro Jahr (Abbildung Z.2c, Technologieszenarien).

Für den klimaneutralen Umbau der Industrie entsteht ein Investitionsbedarf von 11 Mrd. EUR pro Jahr durch Brennstoffwechsel, Energieeffizienz, Anlagen für neue Prozesse und CO₂-Abscheidung (Abbildung Z.2b). Während die Investitionen in diesem Sektor also (verglichen mit anderen Sektoren) gering ausfallen, entstehen hohe Mehrbelastungen durch höhere Betriebskosten, weil klimaneutrale Energieträger teurer sind (z. B. Wasserstoff) als bisher genutzte fossile Brennstoffe (Kapitel Z.3).

Die erheblichen Investitionen durch die Energiewende können eine Chance für eine wirtschaftliche Modernisierung und konjunkturelle Belebung sein. So ergeben sich große Zukunftsmärkte durch grüne Technologien wie batterieelektrische Fahrzeuge, Wärmepumpen, Solarenergie, Windkraftanlagen, Elektrolyseure, Wärme- und Stromspeicher sowie Plattformtechnologien für die Elektrifizierung von Industrieprozessen.

Z.3 Sektorale Kostenstruktur

Die Energiewende verändert Kostenstrukturen und erzeugt Mehrkosten sowie Einsparungen, die je nach Endnutzungssektor (Gebäude, Verkehr und Industrie) stark variieren (Abbildung Z.3a). Mehrkosten und Einsparungen entstehen durch das Zusammenwirken von Verschiebungen bei kapitalgebundenen Ausgaben sowie veränderten Kosten für Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß. Zusätzliche Energiekosten entstehen durch übergangsweise höhere Strompreise aufgrund von Umlagen des Netzausbaus auf die Stromkunden, durch ansteigende Preise für fossile Energieträger (resultierend aus steigenden CO₂-Preisen) und, fast ausschließlich in der Industrie, durch teure nicht-elektrische grüne Energieträger (z. B. Wasserstoff). Energiekosten sinken durch effizientere Energienutzung zumeist aufgrund des Technologiewechsels, wie zum Beispiel beim Betrieb von

Wärmepumpen oder E-Fahrzeugen. Aus den Modellergebnissen lassen sich jährliche Mehrkosten beziehungsweise Einsparungen – als Summe aus annualisierten Kapitalkosten und Betriebskosten – berechnen und zwischen den Szenarien vergleichen.

Der Preis für Strom am Großhandelsmarkt stabilisiert sich langfristig bei 70–80 EUR/MWh. Dabei handelt es sich um Jahresmittelwerte. Über das Jahr betrachtet weisen die Preise eine höhere Variabilität auf als heute (Kapitel 6.3.2). Netzentgelte für Endkunden steigen im Zeitraum 2025–2030 durch Netzausbaukosten, sinken danach aber wieder durch einen höheren Strombedarf (Kapitel 6.3.3). Insbesondere können die bis 2045 notwendigen Investitionen in Übertragungsnetze durch eine integrierte Systemplanung mit regionalen Preisen um circa 92 Mrd. EUR reduziert werden, weil sie die systemdienliche Platzierung und den systemdienlichen Betrieb von Erzeugung und Flexibilität ermöglicht (Kapitel 7.1.2).

Endkundenpreise für Strom sinken bis 2045 unter das Niveau von 2020, ausgenommen in der energieintensiven Industrie (Kapitel 6.3.3). Getrieben ist diese Entwicklung durch die langfristig sinkenden Börsenstrompreise und die breitere Verteilung der Netzentgelte auf mehr Kunden (siehe oben). Die Entwicklung in der Industrie ist stark abhängig von Annahmen über den schrittweisen Abbau von bestehenden Privilegien beim Stromverbrauch, die aus Systemperspektive Fehlanreize setzen.

Die Gestehungskosten von grünem Wasserstoff in Deutschland liegen bei 156 EUR/MWh im Jahr 2030 und sinken auf 110 EUR/MWh im Jahr 2045. Damit bleibt Wasserstoff als Energieträger langfristig teuer und insbesondere teurer als Strom.

In der Industrie dominieren Mehrkosten für Energie (vor allem für Wasserstoff und Derivate). Kapitalkosten spielen eine eher untergeordnete Rolle. Während die Kosten für fossile Energie im Szenario *Technologiemix* gegenüber *Existierende Politiken* im Durchschnitt in 2025–2045

6 Mrd. EUR pro Jahr geringer sind, fallen zusätzlich Kosten für grüne Moleküle in Höhe von 8–29 Mrd. EUR pro Jahr an (Abbildung Z.3b).

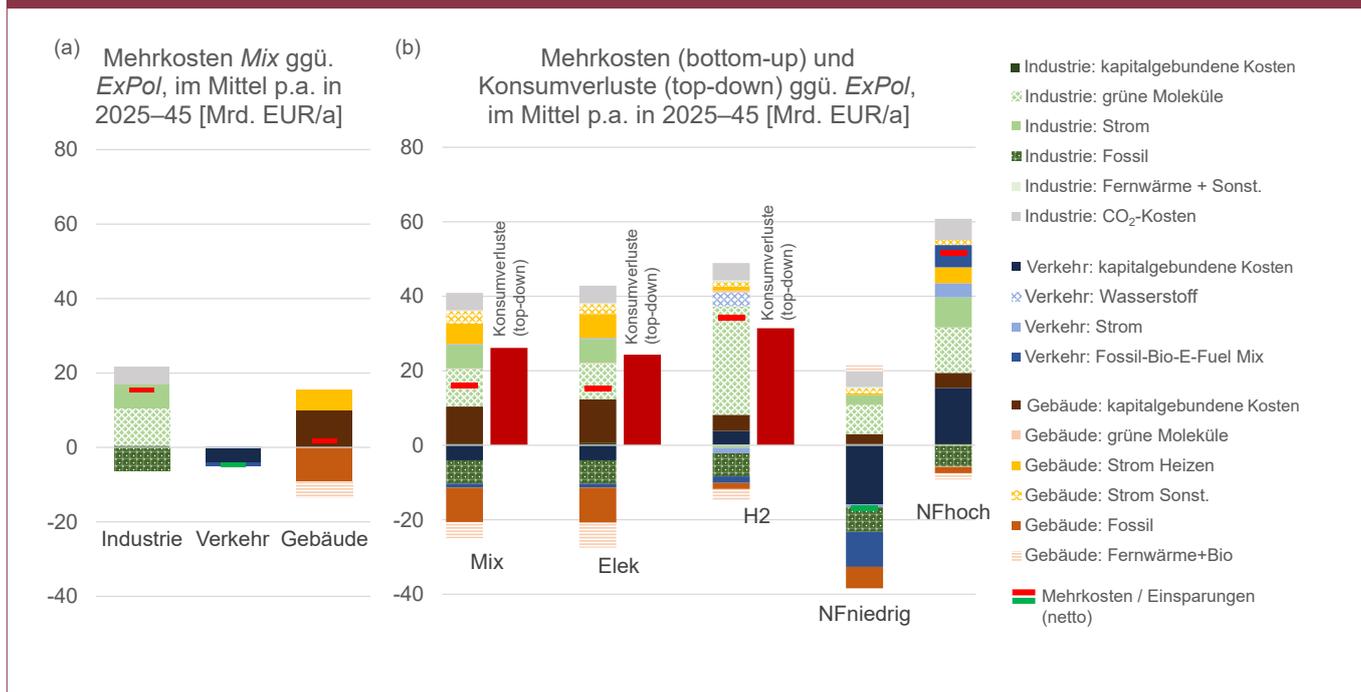
Spätestens ab 2030 rechnet sich die Anschaffung eines Elektro-Fahrzeugs gegenüber einem Verbrennerneufahrzeug für fast alle Endnutzer, meist gilt das sogar schon heute. Das zeigt der Vergleich der Kosten pro gefahrenem Kilometer, die sich aus Anschaffungskosten und Betriebskosten über die Lebensdauer des Fahrzeuges ergeben. Den kurzfristig noch höheren Anschaffungskosten stehen geringere Ausgaben für Energie und Wartung eines E-Fahrzeugs gegenüber (Kapitel 3.3).

Insgesamt ergibt sich im Zielszenario eine Einsparung von 4,9 Mrd. EUR pro Jahr für den Verkehrssektor (in *Technologiemix* gegenüber *Existierende Politiken*), weil geringe zusätzliche Kosten für Strom durch weniger Ausgaben für fossile Kraftstoffe (im Mix mit Bio-Kraftstoffen und E-Fuels) und langfristig geringere kapitalgebundene Ausgaben für E-Fahrzeuge überkompensiert werden (Abbildung Z.3a, Kapitel 3.3).

Wärmepumpen können Heizkosten in Neubauten und Bestandsgebäuden mit guter Wärmeisolation senken. Höhere Anschaffungskosten von Wärmepumpen verglichen mit Gasheizungen stehen niedrigeren Energiekosten für Strom verglichen mit Erdgas (auch aufgrund steigender CO₂-Preise) gegenüber (Kapitel 4.3). Zusatzkosten entstehen vor allem für die Sanierung von Gebäuden in schlechtem energetischem Zustand. Insgesamt ergeben sich Mehrkosten von 1,9 Mrd. EUR pro Jahr für den Gebäudesektor (in *Technologiemix* gegenüber *Existierende Politiken*), da Einsparungen beim Energieausgaben die hohen Investitionskosten im Mittel über den gesamten Sektor nicht aufwiegen (Abbildung Z.3a).

Mehrkosten in der Industrie fallen besonders in der Grundstoffindustrie an. Hierzu zählen unter anderem Metallherzeugung, Grundstoffchemie, Glas- und Keramikbranche sowie Zement- und Kalkindustrie. In diesen Branchen steigen Kosten deutlich durch den Einsatz

Abbildung Z.3: Mehrkosten des Klimaneutralitätsziels.



(a) Mehrkosten des Klimaneutralitätsziels aus den Sektormodellen je Sektor nach verschiedenen Kostenkomponenten aufgeschlüsselt für Technologiemix gegenüber Existierende Politiken; (b) Vergleiche der Klimaschutz-Mehrkosten über verschiedenen Technologieszenarien hinweg (Gebäude inklusive Strom für sonstige Anwendungen). Rote Balken zeigen makroökonomische Mehrkosten des Klimaneutralitätsziels, ermittelt auf Basis von Konsumverlusten im Gesamtsystemmodell REMIND.

von Wasserstoff, durch CO₂-Bepreisung, durch Investitionen in klimaneutrale Anlagen sowie durch Abscheidungs-Anlagen und Infrastruktur für CO₂-Transport und Speicherung (Kapitel 5.3). Im Szenario *Technologiemix* belaufen sich die Mehrkosten gegenüber *Existierende Politiken* über den gesamten Sektor im Mittel in 2025–2045 auf 15,5 Mrd. EUR pro Jahr (Abbildung Z.3a).

Z.4 Gesamtbild

Kosteneffiziente Energiewendestrategien erreichen Klimaneutralität bis 2045 zu Mehrkosten von 16–26 Mrd. EUR pro Jahr (Kapitel 8.2). Die Mehrkosten für Klimaneutralität 2045 ergeben sich aus dem Szenarienvergleich (*Technologiemix* gegenüber *Existierende Politiken*) in einer Top-down-Schätzung eines Gesamtsystemmodells (*REMIND*) sowie aus der Summe der Bottom-up-Schätzungen der Sektormodelle *FORECAST*, *ALADIN* und *REMod*. Während das Gesamtsystemmodell Mehrkosten von 26 Mrd. EUR pro Jahr abschätzt, beträgt die Summe der in den Sektormodellen abgebildeten Mehrkosten 16 Mrd. EUR pro Jahr bis 2045 (Abbildung Z.4b).

Elektrifizierung senkt Kosten über alle Endnutzungssektoren hinweg (Abbildung Z.3b). Das zeigen Modellergebnisse von Szenarien mit variierender Elektrifizierung (*Technologiemix* und *Fokus Elektrifizierung* gegenüber *Fokus Wasserstoff*). Hierbei schneiden Szenarien mit hoher Elektrifizierung generell günstiger ab.

Kosteneffizienz erfordert einen fokussierten Einsatz von Wasserstoff und E-Fuels. Wasserstoff und E-Fuels spielen eine wichtige Rolle bei der Defossilisierung von nicht-elektrischen Energiebedarfen. Werden sie jedoch – wie im Szenario *Fokus Wasserstoff* – deutlich breiter eingesetzt, steigen die Klimaschutzmehrkosten auf 31–34 Mrd. EUR pro Jahr. Wichtigster Treiber solcher Mehrkosten ist zusätzlicher Wasserstoffeinsatz in der Industrie (Abbildung Z.3b).

Die Transformation der Energienachfrage ist eine wichtige Determinante der Klimaschutzkosten. Hohe Akzeptanz und ein beschleunigter Markthochlauf von nachfrageseitigen Klimaschutztechnologien wie Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen sowie klimafreundliche Lebensstile führen zu Einsparungen von 17 Mrd. EUR pro Jahr (Szenario *NFniedrig*) im Vergleich zum Referenzszenario

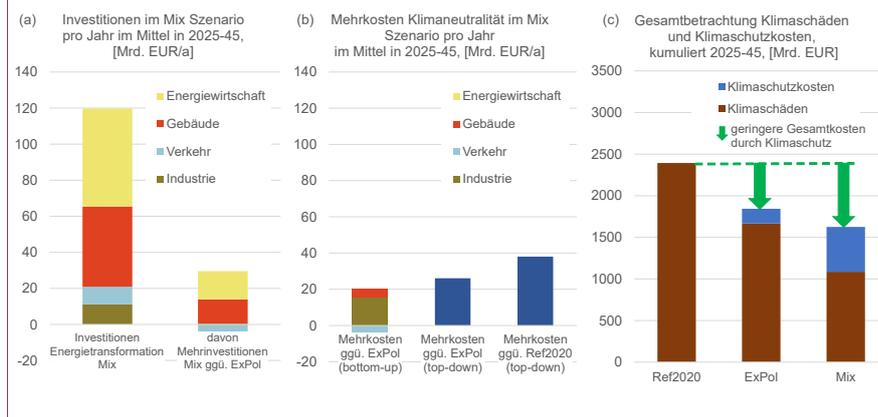
Existierende Politiken. Umgekehrt erhöht ein Beharren in Nachfragesektoren die Kosten deutlich auf 52 Mrd. EUR pro Jahr (Szenario *NFhoch*) (Abbildung Z.3b).

Staatliche Förderprogramme helfen den Markthochlauf neuer Technologien zu fördern, Infrastrukturen aufzubauen und Mehrbelastungen zu reduzieren (Kapitel 8.3). Eine mittlere Abschätzung auf Basis der Szenarien unter der Annahme einer Fortschreibung aktueller Förderparadigmen ergibt fiskalische Bedarfe von circa 40 Mrd. EUR pro Jahr im Jahr 2030 für das Szenario *Technologiemix*.

Wesentliche Komponenten sind die staatlich finanzierten Erneuerbare-Energien-Gesetz-(EEG)-Kosten sowie die Förderung von energetischer Gebäudesanierung und klimafreundlicher Produktion. Zusätzliche Interventionen, beispielsweise eine staatlich finanzierte Reduktion der Stromnetzentgelte oder eine Ausweitung der Klimaschutzverträge für klimaneutrale Prozesse, erhöhen die fiskalischen Bedarfe deutlich. Diesen Ausgaben stehen im Jahr 2030 Einnahmen von circa 50 Mrd. EUR aus der CO₂-Bepreisung gegenüber.

Die Mehrkosten für die Erreichung der Klimaneutralität sind deutlich geringer als die vermiedenen Klimaschäden (Kapitel 8.2). Zu diesem Ergebnis kommt eine Abwägung von Kosten und Nutzen von Klimaschutz. Der Nutzen wurde dabei gemäß der vermiedenen Klimaschäden durch die reduzierten Treibhausgas-(THG)-Emissionen Deutschlands abgeschätzt (UBA 2024). Die Kosten ergeben sich aus dem Vergleich eines Szenarios, das Klimaneutralität 2045 erreicht, mit Szenarien, die nur bisher beschlossene klimapolitische Maßnahmen berücksichtigen oder nur sehr schwache Klimapolitik beinhalten (*Technologiemix* gegenüber *Existierenden Politiken* und *Referenz2020*). Hier zeigt sich, dass die Klimaschäden durch ambitionierten Klimaschutz mehr als halbiert werden und der wirtschaftliche Nutzen gegenüber den Kosten deutlich überwiegt (Abbildung Z.4c)

Abbildung Z.4: Vergleich der verschiedenen Kostenmetriken.



(a) Investitionen bzw. Mehrinvestitionen, (b) Bottom-up und Top-down Abschätzungen zu Mehrkosten des Klimaneutralitätsziels, und (c) kumulierte und mit 3 % diskontierte Gesamtkosten durch Klimaschäden und Klimaschutzkosten. In (b) und (c) werden Kosten relativ zu einem Szenario Ref2020 berechnet, das die kontrafaktische Entwicklung ohne die zusätzlichen Politikmaßnahmen seit 2020 beschreibt.



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:



@ariadneprojekt.bsky.social



Kopernikus-Projekt Ariadne



ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf [kopernikus-projekte.de](https://www.kopernikus-projekte.de)

Wer ist Ariadne? In der griechischen Mythologie gelang Theseus durch den Faden der Ariadne die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne im Konsortium von 27 wissenschaftlichen Partnern. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit – Helmholtz-Zentrum Potsdam (RIFS) | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Hertie School | ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Julius-Maximilian-Universität Würzburg | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung Umweltenergierecht | Stiftung Wissenschaft und Politik | Technische Universität Berlin | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Technische Universität Nürnberg | Universität Duisburg-Essen | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung