

Fraunhofer CINES Energiesystemanalyse

7 Empfehlungen zum Gelingen der
Energiewende



Autoren

Prof. Dr. Mario Ragwitz, Prof. Dr. Hans-Martin Henning,
Anna Billerbeck, Prof. Dr. Rolf Bracke, Prof. Dr. Harald
Bradke, Dr. Tobias Fleiter, Norman Gerhardt, Dr. Anne
Held, Sebastian Herkel, Dr. Christoph Kost, Dr. Michael
Krail, Dr. Benjamin Pfluger, Dr. Patrick Plötz, Dr. Matthias
Rehfeldt, Prof. Dr. Kurt Rohrig, Prof. Dr. Rainer Walz,
Dr. Marijke Welisch, Dr. Jenny Winkler

Inhalt

Einleitung	1
1 Technologieoffenheit oder klare Vorgaben: Die richtige Balance finden	2
2 Energiepreise: Mit grundlegenden Reformen Sektorkopplung fördern, sowie Sozialverträglichkeit und Wettbewerbsfähigkeit sichern	6
3 Erneuerbare Energien: Ein stark beschleunigter Ausbau von Wind- und Solarenergie ist das Rückgrat der Energiewende	8
4 Wärmewende: Sanierung, Wärmepumpen und Wärmenetze als Schlüssel zu einem klimaneutralen Gebäudebestand	11
5 Industriegewende: Ein klarer Rahmen ermöglicht der Industrie Investitionen in CO ₂ -neutrale Produktionstechniken	15
6 Verkehrswende: CO ₂ -armer Verkehr ist möglich, erfordert aber schnelles, klares und ehrgeiziges Handeln	19
7 Infrastrukturen: Energieinfrastrukturen brauchen Planungssicherheit und systemische Ansätze	22
Forschung und Entwicklung	25
Quellenverzeichnis	26
Abbildungsverzeichnis	27
Impressum	28

Einleitung

Die verschärften europäischen Klimaschutzziele und die neuen Ziele im Klimaschutzgesetz der Bundesregierung sind sehr ambitioniert und erfordern umgehende und weitgehende Maßnahmen. Die neue Bundesregierung darf deshalb keine Zeit verlieren und wird schnell und entschlossen handeln müssen, um diese Ziele zu erreichen.

Die Expert:innen der Energiesystemanalyse des Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) haben zentrale Herausforderungen und Lösungsansätze für die nächste Legislaturperiode herausgearbeitet. Die Empfehlungen sind das Ergebnis eines intensiven Diskussionsprozesses innerhalb und zwischen den beteiligten Instituten (Fraunhofer ISI, ISE, IEE und IEG). Sie speisen sich aus den Ergebnissen zahlreicher Forschungsprojekte und den jahrzehntelangen Erfahrungen der Expert:innen. Die CINES-Wissenschaftler:innen nehmen sieben zentrale Handlungsfelder der Transformation des Energiesystems in den Blick, ohne jedoch einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Dabei haben sich die Expert:innen der übergeordneten Rolle von Technologieoffenheit gewidmet. Im Hinblick auf die verstärkten Ambitionen und die Dringlichkeit beim Klimaschutz wird die Frage erörtert, ob bestehende Grundprinzipien zur Technologieoffenheit neu gedacht werden müssen.

Mit der Veröffentlichung möchten wir einen Beitrag leisten, um die kommenden Herausforderungen für den Umbau des Energiesystems erfolgreich zu bewältigen, die mutige Schritte von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern. Von Seiten der Wissenschaft wollen wir diesen Prozess mit kontinuierlicher Forschung und neuen Erkenntnissen, sowie mit Transparenz und einem wissenschaftlich fundierten Diskurs begleiten und unterstützen.

Zusammenfassung der Empfehlungen:

1. Technologieoffenheit oder klare Vorgaben: Die richtige Balance finden. Für das Gelingen der Energiewende ist langfristige Technologieoffenheit ein wichtiger Grundsatz. Es stellt sich jedoch die Frage, ob das neue Klimaschutzgesetz durch den erhöhten Zeitdruck bei der Umsetzung der Energiewende der Technologieoffenheit nicht de facto deutliche Grenzen setzt. Die erforderlichen Infrastrukturplanungen verlangen klare Richtungsentscheidungen, und das Portfolio an Technologien, die bis 2030 schnell und stark ausgebaut werden können, ist begrenzt. Die Politik muss daher den Mut haben, langfristig offen für neue Technologien zu sein, kurzfristig aber die etablierten, schnell verfügbaren Technologien zielgerichtet und mit Nachdruck zu fördern.

2. Energiepreise: Mit grundlegenden Reformen Sektorenkopplung fördern, sowie Sozialverträglichkeit und Wettbewerbsfähigkeit sichern. Hohe Strompreise behindern derzeit

den Ausbau der Sektorenkopplung und sollten über eine Reduzierung der staatlich induzierten Energiepreisbestandteile wie der EEG-Umlage und gegebenenfalls der Stromsteuer gesenkt werden. Dies könnte gleichzeitig einkommensschwächere Haushalte entlasten.

3. Erneuerbare Energien: Ein stark beschleunigter Ausbau von Wind- und Solarenergie ist das Rückgrat der Energiewende. Die heutige Ausbaugeschwindigkeit ist nicht ausreichend, um die Klimaziele zu erreichen. Die Ausschreibungsmengen für Onshore-Wind sollten auf 6-8 GW/a und des PV-Zubaus auf 8-16 GW/a erhöht werden. Der Ausbau von Onshore-Wind sollte zudem durch die Ausweisung von mehr Flächen und einer Verbesserung des Genehmigungsprozesses beschleunigt werden.

4. Wärmewende: Sanierung, Wärmepumpen und Wärmenetze als Schlüssel zu einem klimaneutralen Gebäudebestand. Dementsprechend sollte bis 2045 sowohl die Sanierungsrate als auch die Sanierungstiefe deutlich gesteigert, 6 Mio. Wärmepumpen installiert und die Ausbaurate von Nah- und Fernwärme um das Dreifache gesteigert werden – bei der Fernwärme mit besonderem Fokus auf hohe Anteile von Wärmepumpen, Solar- und Geothermie, Abwärme, sowie Biomasse.

5. Industriegewende: Ein klarer Rahmen ermöglicht der Industrie Investitionen in CO₂-neutrale Produktionstechniken. Ohne diesen können Investitionen in neue Anlagentechnik wie zum Beispiel die Umstellung der Stahlherstellung auf wasserstoffbasierte Verfahren oder die Elektrifizierung der Bereitstellung von Prozesswärme derzeit nicht getätigt werden. Zur Minderung der Emissionen in der Zementindustrie und anderer Prozesse sollte die Politik auch Perspektiven für die Abscheidung und Speicherung von CO₂ erarbeiten.

6. Verkehrswende: CO₂-armer Verkehr ist möglich, erfordert aber schnelles, klares und ehrgeiziges Handeln. Dazu zählt etwa eine schnelle Umstellung der Fahrzeugflotte auf emissionsfreie Fahrzeuge, die Einführung ambitionierter Flottengrenzwerte für Pkw und Lkw in Europa, die Einführung eines bundesweiten Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen oder ein rasanter Infrastrukturausbau, etwa bei der Schnellladeinfrastruktur für Elektro-Pkw und -Lkw.

7. Infrastrukturen: Energieinfrastrukturen brauchen Planungssicherheit und systemische Ansätze. Egal ob Stromnetze, Wärmenetze für urbane Räume oder Wasserstoff für die Industrie – viele Energiewende-Optionen benötigen Infrastrukturen. Es braucht eine klare Systementwicklungsstrategie über alle Sektoren hinweg, die Orientierung bietet und die langfristigen energie- und klimapolitischen Ziele im Blick behält. Für Transport- und Verteilnetze sind dabei sektorenübergreifende, integrierte Planungswerkzeuge und -prozesse erforderlich, auf deren Basis der effiziente Ausbau proaktiv umgesetzt werden kann.



**Technologieoffenheit
oder klare Vorgaben:
Die richtige Balance
finden.«**

1. Technologieoffenheit oder klare Vorgaben

In der Diskussion um die beste Strategie für die Erreichung der Klimaziele gilt Technologieoffenheit als ein wesentlicher Grundsatz für ein effizientes Gelingen der Energiewende. Sie ermöglicht, dass sich am Markt die besten Lösungen durchsetzen können. Die Politik setzt dabei den Rahmen, trifft aber keine technologischen Festlegungen. Ein technologieoffener Wettbewerb bildet somit einen zentralen Mechanismus zur Erreichung eines möglichst kosteneffizienten klimaneutralen Energiesystems.

Technologieoffene, auf Wettbewerb basierende Maßnahmen sind sinnvoll, wenn es viele unterschiedliche Optionen gibt, um ein Ziel zu

erforderliche Aus-, Um- und Neubau wesentlicher Infrastrukturen der Technologieoffenheit nicht de facto deutliche Grenzen setzt und steuernde Festlegungen erfordert. Besonders relevant sind dabei drei Aspekte:

1. Die Energiewende erfordert einen starken Infrastrukturausbau. Es wird nicht möglich sein, Infrastrukturen für alle theoretisch möglichen Lösungen bereitzustellen, damit ein Technologiewettbewerb in der Umsetzung stattfinden kann. Ein Beispiel ist die Wärmeversorgung im städtischen Raum. Damit es hier zu einem Wettbewerb zwischen Wasserstoff, grünem Methan, Fernwärme und Wärmepumpen kommen kann, müssten gleich mehrere Netzinfrastrukturen aus- oder umgebaut werden, um eine Entscheidungsfreiheit für Endkunden zu ermöglichen. So erfordern beispielsweise Fernwärmenetze den Anschluss möglichst vieler Verbraucher, um die Infrastruktur zu refinanzieren. Folglich wäre es nicht sinnvoll, gleichzeitig auf Fernwärme und wasserstoffbasierte Wärmebereitstellung in einem Versorgungsgebiet zu setzen. Diese Entscheidungen werden sich regional unterscheiden, aber sie müssen sehr zeitnah getroffen werden, um die erforderlichen Infrastrukturen zu planen und zu bauen. Kommunale Versorger und Endkunden sind dabei auf klare Leitplanken hinsichtlich der Optionen und ihrer Zeitpfade angewiesen, um nachhaltige Entscheidungen treffen zu können.

2. Die Anforderungen an die Auf- und Ausbaugeschwindigkeit steigen deutlich an. Für einige der Lösungen, für die Technologieoffenheit eingefordert wird, geschieht dies auch, da sie technologisch noch in den Kinderschuhen stecken, langfristig aber möglicherweise großes Potential haben. Die sehr ambitionierten Zwischenziele lassen allerdings nur begrenzten Spielraum für Experimente

» Durch die verschärften Ziele des neuen Klimaschutzgesetzes ist der Blick auf die mittelfristige Effektivität nun deutlich stärker erforderlich. «

erreichen und noch nicht klar ist, welche Technologien aktuelle und zukünftig bestehende Anforderungen – insbesondere bezüglich der Kosteneffizienz – am besten erfüllen. Markt-basierte, wettbewerbliche Lösungen sind insbesondere dann nützlich, wenn es darum geht, dezentrales Wissen zu nutzen, weil sich z.B. Bedürfnisse und Gegebenheiten vor Ort und bei den Nutzern stark unterscheiden können. Ferner ist Technologieoffenheit in einer Phase der Forschung und Entwicklung neuer Technologien sinnvoll, um das Innovationspotenzial auszuschöpfen, um neue Lösungen zu entwickeln und voranzutreiben.

Allerdings stellt sich die Frage, ob der durch die ambitionierten Treibhausgas-Reduktionspfade nochmals erhöhte Zeitdruck, und der



zu, zumindest in der kurzfristigen Perspektive. Es ist wichtig, auch weniger am Markt etablierten Technologien mit echtem Entwicklungspotential eine Chance zu bieten. Nichtsdestotrotz werden durch die begrenzte Skalierungsgeschwindigkeit für neue Technologien alle Optionen, die sich nicht bereits in der Phase des Markthochlaufs befinden, bis 2030 allenfalls begrenzte Beiträge zur Erreichung der Zwischenziele liefern können. Zur Dekarbonisierung sind aktuell in vielen Fällen ausgereifte Optionen verfügbar, die sich bereits in der Marktdiffusion befinden. Diejenigen Ansätze, die schnell und substanziiell Emissionen senken, müssen als Arbeitspferde der Energiewende anerkannt und mit Hochdruck vorangetrieben werden. Ein Beispiel: Sowohl batterieelektrische Fahrzeuge als auch Wasserstofffahrzeuge sind prinzipiell marktreif und marktvorbereitet. 2020 wurden allerdings weltweit über zwei Millionen batterieelektrische Autos verkauft und nur zehntausend Wasserstofffahrzeuge. Wasserstoffautos werden mittel- und langfristig für bestimmte Bereiche zweckmäßig sein und sollten deshalb konsequent weiterverfolgt werden. Dennoch sprechen viele Argumente und Entwicklungen dafür, dass bis 2030 Batteriefahrzeuge den Markt an treibhausgasneutralen Pkw dominieren werden. Diese Erkenntnis kann und muss in der Priorisierung des Infrastrukturausbaus berücksichtigt werden.

3. Es gibt dezentrales Wissen, aber auch dezentrale Unsicherheit. Technologieoffenheit baut unter anderem darauf, dass Akteure zielgerichtet die beste Lösung für ihre jeweiligen Umstände und Bedürfnisse suchen und umsetzen. Dem stehen in der Realität häufig Informationsasymmetrien gegenüber. Akteure verfügen aus unterschiedlichen Gründen oft über unzureichendes Wissen für strategische Entscheidungen, u.a. weil die Herausforderungen der Energiewende teilweise hochkomplex sind und von vielen unsicheren Faktoren bestimmt werden, aber auch weil wichtige Entscheidungen außerhalb ihrer Einflussphäre noch nicht gefällt wurden. So können kommunale Versorger nicht selber entscheiden, wann sie an ein zukünftiges Wasserstoffnetz angebunden werden können, wie der Anteil grüner Gase im Fernleitungsnetz verlaufen wird oder wie sich zukünftige Steuern, Abgaben und Umlagen entwickeln werden. Auch von Pkw-Käufern kann nicht erwartet werden, dass sie vor dem Kauf CO₂-Preise, Biokraftstoff- und PtL-Beimischungsquoten für die nächsten 15 Jahre abschätzen und mit Strompreisprognosen abgleichen. Somit besteht die Gefahr, dass Entscheidungen getroffen werden, die sich im Nachhinein als falsch erweisen, oder dass aus der Sorge vor falschen Entscheidungen wichtige Investitionen verzögert werden. Daher muss es Aufgabe der Politik sein, die Unsicherheit der Akteure durch klare Vorgaben zu verringern. Dabei senkt ein klarer Rahmen auch das Risiko und damit die Finanzierungskosten und kann so die Energiewende günstiger machen.

Power-to-X im Spannungsfeld von Technologieoffenheit und klaren Vorgaben

Ein Feld, in dem Technologieoffenheit besonders oft gefordert wird, ist der Bereich Wasserstoff und Power-to-X. Dabei besteht über alle Studien hinweg Einigkeit, dass strombasierte chemische Energieträger für das Erreichen von Treibhausgasneutralität in bestimmten Bereichen unabdingbar sind: Im Flug- und Schiffsverkehr, als Rohstoff in der Industrie und für Langzeitenergiespeicher in der Energiewirtschaft werden in Zukunft treibhausgasneutrale stoffliche Energieträger benötigt. Allerdings stimmen die meisten Studien auch darin

überein, dass die in den nächsten Jahren erwart- und umsetzbaren CO₂-Preise alleine nicht ausreichen werden, um PtX-Produkte wettbewerbsfähig zu machen. Sollen diese Produkte wegen der langfristigen Erfordernisse dennoch ausgebaut werden, ist eine zielgerichtete Förderung erforderlich. Auch mit dieser werden kurz- oder mittelfristig nur begrenzte PtX-Mengen zu Verfügung stehen. Weltweit ist bisher weniger als ein halbes Gigawatt Elektrolyseleistung in Betrieb; auch bei einem Markthochlauf in Rekordgeschwindigkeit werden bis 2030 nicht genügend PtX-Energieträger zur Verfügung stehen, um einen großen Teil der erforderlichen Emissionsvermeidung durch den Ersatz fossiler Energieträger durch PtX zu erreichen.



Auch der effiziente Umgang mit der begrenzten Ressource erneuerbarer Strom ist dabei von hoher Bedeutung, besonders bis eine vollständig treibhausgasneutrale Stromversorgung etabliert ist. Wird PtX in Bereichen eingesetzt, in denen direkt-elektrische Lösungen verfügbar sind, erhöht sich der Strombedarf durch die Umwandlungsverluste substantiell. In Verkehr und Gebäuden beispielsweise, erfordern PtX-Produkte durch Umwandlungsverluste und schlechtere Effizienz 3- bis 5-mal so viel Strom wie direkt-elektrische Alternativen.

Diese Randbedingungen führen dazu, dass der Beitrag von PtX bis 2030 begrenzt sein wird. Hier auf Technologieoffenheit zu setzen birgt somit die Gefahr, dass von vielen Akteuren zu lange auf eine baldige Verfügbarkeit großer, günstiger PtX-(Import-)Mengen für ihre jeweiligen Anwendungen spekuliert wird und andere Optionen nicht rechtzeitig verfolgt werden.

PtX zeigt somit Möglichkeiten, aber auch die Grenzen und Risiken von Technologieoffenheit vor dem Hintergrund der ambitionierten Klimaziele auf. Technologieoffenheit ist ein wichtiges Instrument für langfristige Kosteneffizienz und Resilienz. Sie muss vor allem bei »Technologien auf Augenhöhe« gewährleistet sein, also bei Optionen, die eine zumindest vergleichbare Marktreife haben und in direktem Wettbewerb stehen. Dies gilt beispielsweise für den Wettbewerb zwischen Wind- und Solarenergie oder für unterschiedliche Technologien zur klimaneutralen Bereitstellung von Fernwärme. Auch bei Lkws ist derzeit noch nicht klar erkennbar, welche Antriebstechnologien sich in welchen Segmenten durchsetzen werden. Langfristige Technologieoffenheit darf jedoch auch in diesen Fällen nicht als Vorwand dafür dienen, dass die heute dringend erforderlichen Schritte mit dem Verweis auf eine ungewisse Zukunft nicht oder nur zögerlich angegangen werden.

Durch die verschärften Ziele des neuen Klimaschutzgesetzes ist der Blick auf die mittelfristige Effektivität nun deutlich stärker erforderlich. Um diese zu erreichen, müssen verfügbare, etablierte Optionen mit vollem Nachdruck verfolgt werden. Dabei muss die Politik auch den Mut aufbringen, Akteuren Klarheit und Planungssicherheit für ihre Investitionen zu bieten. Solange zu große Unklarheit herrscht, welche Optionen für welche Bereiche verfügbar sein werden und wie

der regulatorische Rahmen dafür gestaltet wird, werden Investitionen aufgeschoben und die Geschwindigkeit der Transformation wird unnötig verlangsamt. Längerfristig ist es sinnvoll, verschiedene Optionen zur Verfügung zu haben. Diese sollten bereits heute entwickelt werden, ohne jedoch die schnelle, zielgerichtete Marktdiffusion bereits verfügbarer Optionen zu verhindern.



Energiepreise: Mit grundlegenden Reformen Sektorkopplung fördern, sowie Sozialverträglichkeit und Wettbewerbsfähigkeit sichern.«

2. Energiepreise und Umlagen



In Deutschland wird bereits über den CO₂-Preis aus dem europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) und den in 2021 eingeführten nationalen CO₂-Preis im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG), ein Preisanreiz zur Vermeidung fossiler Energietechnologien gesetzt. Der im Jahre 2005 eingeführte EU-ETS stellt das zentrale europäische Klimaschutzinstrument für Energiewirtschaft, energieintensive Industrie und seit 2012 auch für den europäischen Luftverkehr dar, während der nationale CO₂-Preis im Rahmen des BEHG auf Brennstoffe im Wärme- und Verkehrssektor abzielt.

Neben der CO₂-Bepreisung sind jedoch weitere Maßnahmen nötig. So haben CO₂-Preise nicht in allen Sektoren eine hinreichende Lenkungswirkung. Die Zahlungsbereitschaft für fossile Kraftstoffe ist im Verkehr vergleichsweise hoch, beispielsweise, weil auf Grund der Lebenssituation eine Umstellung oder Anpassung schwer möglich ist, ausreichend finanzielle Mittel verfügbar sind oder der Arbeitgeber die Kraftstoffkosten übernimmt. Im Wärmebereich ist unter anderem das Vermieter-Mieter-Dilemma ein wesentliches Hindernis, da Vermieter die Investitionen in neue Technologien oder Wärmedämmung tragen, jedoch die Mieter davon profitieren (siehe Warmmietenmodell Kapitel 5). Zudem bestehen nicht-monetäre Hemmnisse - beispielsweise fehlende Informationen über zukunftsfähige Wärmesysteme oder Vorurteile und Unkenntnisse bezüglich neuer Technologien.

Hohe Strompreise behindern derzeit den Ausbau der Sektorenkopplung und sollten über eine Reduzierung der staatlich induzierten Energiepreisbestandteile gesenkt werden.

Die Sektorenkopplung führt zu einem erhöhten Strombedarf für Gebäude, Mobilität und für industrielle Anwendungen. Gleichzeitig wird jedoch die Marktdurchdringung der entsprechenden Technologien durch eine höhere Belastung von Strom gegenüber stofflichen fossilen Endenergieträgern mit Steuern, Abgaben und Umlagen behindert^{1 2 3}. Diese Verzerrung stellt trotz steigender CO₂-Preise ein wichtiges Hemmnis für den Einsatz von Technologien wie beispielsweise Wärmepumpen dar. Zusätzlich können die statischen Leistungspreise für Stromnetz-entgelte den Einsatz von neuen flexiblen Stromverbrauchern einschränken.

Sozialverträglichkeit und Wettbewerbsfähigkeit der Industrie sind zu gewährleisten.

Mit einer Umgestaltung von Steuern, Abgaben und Umlagen sind Verteilungseffekte verbunden, das heißt Entlastungen bestimmter Verbrauchergruppen oder Technologien führen gleichermaßen zu Mehrbelastungen anderer Akteure. Neben der Anreizwirkung für klimafreundliche Sektorenkopplungstechnologien sind weitere Kriterien wie die Gewährleistung der Sozialverträglichkeit sowie die Wettbewerbsfähigkeit der im internationalen Wettbewerb stehenden Industrie zu berücksichtigen. Grundsätzlich sind Verbrauchergruppen wie die Industrie oder Haushalte sehr unterschiedlich von Änderungen der Energiepreise betroffen⁴. Zudem unterscheiden sich die Verteilungswirkungen innerhalb der Industriezweige und Haushalte. Ausschlaggebend für die Betroffenheit sind die bei den Endverbrauchern vorhandenen Technologien und der damit verbundene Endenergiebedarf und Energieträgermix.

Die Refinanzierung der strompreissenkenden Maßnahmen sollte primär über die Erhöhung der CO₂-Preise ermöglicht werden.

Dies bedeutet konkret, dass eine Absenkung der EEG-Umlage und gegebenenfalls der Stromsteuer zur Dekarbonisierung des Energiesystems beitragen kann. In Summe ist bei der Umsetzung der Maßnahmen Aufkommensneutralität zu gewährleisten. Das bedeutet, dass die Finanzierungsfunktion für die nicht systematisch über den Markt refinanzierten Kosten zur Förderung erneuerbarer Energien - derzeit finanziert über die EEG-Umlage - gewährleistet werden muss. Gleichzeitig müssten die entgangenen Einnahmen refinanziert werden, was beispielsweise über eine Erhöhung des CO₂-Preises im Rahmen des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) möglich wäre.

Zur Illustration der Verteilungswirkungen hilft das folgende Beispiel: Eine Reduzierung der EEG-Umlage auf 0 und eine Refinanzierung über den nationalen CO₂-Preis würde für das Jahr 2025 einen CO₂-Preis in Höhe von 82€/t CO₂ erfordern. Wie in Abbildung 1 zu sehen, würde eine Absenkung der EEG-Umlage auf 0 in Kombination mit einer Refinanzierung über einen CO₂-Preis zur Wirtschaftlichkeit der elektrischen Wärmepumpe im Vergleich zum Brennwärtekessel führen.

Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben und Maßnahmen für die nächste Legislaturperiode:

■ **Abbau der Verzerrung bei Belastungen der Strompreise über eine Reduzierung bzw. Abschaffung der EEG-Umlage und gegebenenfalls der Stromsteuer.** Die Verzerrung bei Belastungen der Strompreise sollte über eine Reduzierung bzw. Abschaffung der EEG-Umlage und gegebenenfalls der Stromsteuer abgeschafft werden. Diese Maßnahme wirkt zudem als Entlastung für einkommensschwächere Haushalte.

■ **Diese Maßnahmen sollten über eine Erhöhung des CO₂-Preispfades im BEHG refinanziert werden.** Diese Anpassung sollte kontinuierlich erfolgen, um Planungssicherheit und Zeit für Reaktionen zu gewährleisten. Zudem könnte eine sprunghafte Einpreisung zu starken sozialen Verwerfungen und einer Beeinträchtigung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit führen. Ein weiterer Vorteil der CO₂-basierten Refinanzierung besteht in der verbesserten Internalisierung der Schadenskosten.

■ **Zur Gewährleistung der Sozialverträglichkeit können neben der Stromkostensenkung weitere Maßnahmen für vulnerable Konsumenten erwogen werden.** Die konkrete Ausgestaltung wie die Rückerstattung pro Kopf oder pro Haushalt ist zu diskutieren und sollte der Lenkungswirkung zur Förderung von Sektorkopplungstechnologien nicht im Wege stehen.

■ **Um die Wettbewerbsfähigkeit insbesondere der energieintensiven Industrie weiter zu gewährleisten, gibt es derzeit zahlreiche Ausnahmeregelungen, wie die Entlastungen bei EEG-Umlage und Netzentgelten, die gleichzeitig aber eine hohe Komplexität mit sich bringen.** Hier sollten sinnvolle Anpassungen dieser Ausnahmen erarbeitet werden. Beispielsweise sollten Ausnahmen im Rahmen der Netzentgeltverordnung mit dem Ziel einerseits der Reduktion des Eigenstromanreizes der Industrie-Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und andererseits der Reduktion der Kostenbelastung für die Allgemeinheit angepasst werden. Ähnlich wie im Bereich der Sozialverträglichkeit können gegebenenfalls notwendige finanzielle Kompensationsmaßnahmen in Betracht gezogen werden.

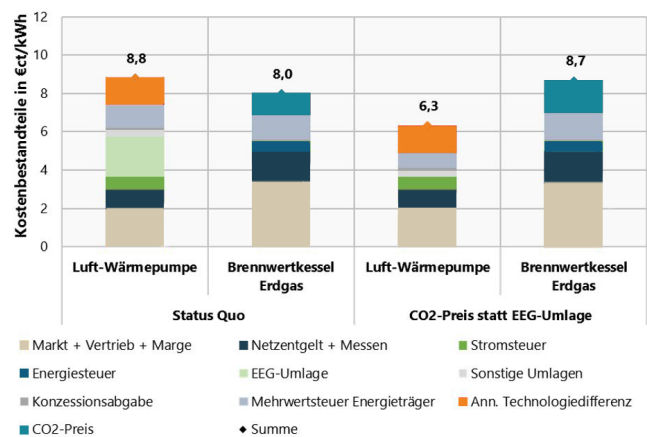


Abbildung 1 Kostenvergleich der Luft-Wärmepumpe im Vergleich zum gasbetriebenen Brennwärnkessel.

■ **Generell ist eine Reform der Netzentgelte notwendig, angepasst an die Erfordernisse fluktuierender erneuerbarer Energien.** Neben den diskutierten Anreizen für unterbrechbare dezentrale Verbraucher (Wärmepumpen, Elektromobilität) bedarf es hier einer Dynamisierung der sogenannten »atypischen Netznutzung« (Großwärmepumpen, Elektrodenkessel), bei der Verbraucher in festgelegten statischen Hochlastzeiten von einer Reduktion der Netzentgelte profitieren. Für nicht flexible Verbraucher ermöglichen höhere Grundgebühren beziehungsweise Leistungspreise dagegen eine verursachergerechte Kostenzuordnung, insbesondere vor dem Hintergrund von vermehrter PV-Eigenversorgung.

■ Begleitende ordnungspolitische Maßnahmen werden notwendig sein und werden in den folgenden Kapiteln zu den einzelnen Sektoren aufgegriffen.



**Erneuerbare Energien:
Ein stark beschleunigter Ausbau von
Wind- und Solarenergie ist das Rückgrat der
Energiewende.«**

3. Ausbau Erneuerbarer Energien

Aufgrund der Notwendigkeit einer ambitionierten CO₂-Minderung in der Stromerzeugung und der zusätzlich benötigten Strommengen bedingt durch die Elektrifizierung im Rahmen der Sektorenkopplung ist ein starker und schneller Ausbau der erneuerbaren Energien dringend erforderlich. Der Strombedarf wird - basierend auf der Verfügbarkeit an erneuerbaren Energien - überwiegend durch Windkraft an Land und auf See als auch durch Photovoltaik gedeckt werden. Derzeit ist jedoch insbesondere der Ausbau an Onshore Wind in den letzten Jahren stark zurückgegangen, unter anderem bedingt durch fehlende rechtssichere Flächenausweisung. Während im Jahr 2017 noch 5.3 GW^{1 2 3} Windkraftkapazität an Land zugebaut oder durch Repowering gestärkt wurde, waren es 2019 nur noch knapp über 1 GW und 1.4 GW in 2020. Eine Folge dieses Einbruches ist, dass Wertschöpfungsketten der Windindustrie beschädigt wurden. Der Ausbau der Onshore Windenergie stellt derzeit den Flaschenhals beim Ausbau der erneuerbaren Energien dar.

Auch der Ausbau der Offshore Windenergie wird einen wesentlichen Beitrag zur Zielerreichung im Stromsektor leisten und trägt aufgrund der hohen Volllaststunden auch maßgeblich zur Versorgungssicherheit bei. Aufgrund der begrenzten Kapazitäten im Stromnetz in Norddeutschland wird auch der Wasserstoff-Elektrolyse eine bedeutende Rolle bei der Systemintegration der Windenergie zukommen.

Neben dem Ausbau der Windenergie spielt die Nutzung der Photovoltaik eine entscheidende Rolle, wird jedoch eine reduzierte oder zu langsam fortschreitende Entwicklung der Onshore Windenergie nicht vollständig kompensieren können; zusätzlich zur bereitgestellten Energiemenge ist die unterschiedliche Saisonalität zu berücksichtigen. Neben den energiewirtschaftlichen Aspekten sind industriepolitische Faktoren von Bedeutung für eine erfolgreiche Energiewende. So lassen sich insbesondere im Bereich der Photovoltaik durch neue vollautomatische Produktionsverfahren und eine fördernde Industriepolitik einst verloren gegangene Teile der Wertschöpfungskette wieder neu erschließen.

Auch Bandbreiten zukünftiger Ausbaupfade bedingen klare Entscheidungen für heute

Wie hoch der Bedarf an erneuerbaren Energien genau sein wird, hängt unter anderem davon ab, ob direktelektrische Optionen oder synthetische Energieträger stärker im Fokus der Sektorenkopplung stehen oder wie stark wir auf Importe setzen. Trotz dieser Unsicherheiten sind aus heutiger Sicht klare Entscheidungen für die konkrete Steigerung des EE-Ausbaus möglich und notwendig. Basierend auf der Nutzung von Energiesystemmodellen der CINES Institute erwarten wir einen Ausbau der PV bis 2050 in Höhe von 200-400 GW, während der Ausbau für Onshore Wind auf 130-180 GW und Offshore Wind auf 40-55 GW geschätzt wird.

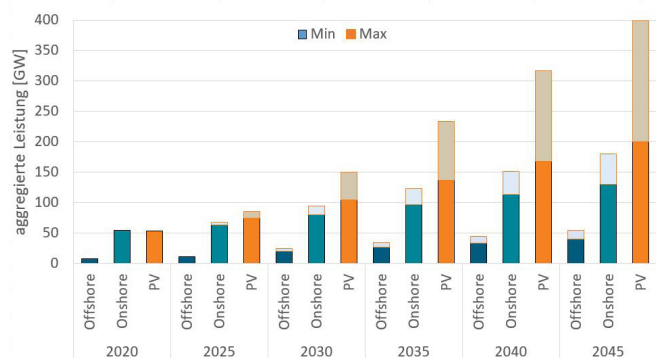


Abbildung 2: Bandbreiten für einen Wind-Pfad (stärkerer Windausbau) und einen PV-Pfad (stärker Ausbau Photovoltaik), die sich aus den unterschiedlichen Szenariorechnungen der Fraunhofer-CINES-Institute ergeben 3

Der ambitionierte Ausbau der erneuerbaren Energien ist vereinbar mit der Gewährleistung der Versorgungssicherheit.

Trotz der hohen Ambitionen kann die Versorgungssicherheit im europäischen Verbund sowohl durch einen moderaten Zubau an neuen Gaskraftwerken (Fokus auf KWK-Anlagen, H₂-ready) und die Nutzung von bestehenden Steinkohle-Kraftwerken als Back-Up gewährleistet werden⁵. Eine kosteneffiziente Zielerreichung erfordert insbesondere einen Ausbau der Übertragungsnetze, der über die aktuellen Netzausbaupläne,



die derzeit den Zeitraum bis 2035 abdecken, hinausgeht. Verzögerungen im Netzausbau können durch weitere Flexibilitätsoptionen, jedenfalls teilweise und zeitlich begrenzt, kompensiert werden. Zu diesen Optionen gehören zusätzliche Netz-Betriebsmittel zur besseren Auslastung der Netze (Netzbooster, Querregler, Freileitungs-Monitoring) sowie die Nutzung von Flexibilitätsoptionen im Strommarkt und Redispatch (Elektrodenkessel, Elektrolyse, Speicher, Netzersatzanlagen).

Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben und Maßnahmen für die nächste Legislaturperiode:

- Die Ausschreibungsmengen für Onshore-Wind sollten auf 6-8 GW/a und des PV-Zubaus (inklusive geförderter Kleinanlagen) auf 8-16 GW/a erhöht werden. Dabei sollte zudem auf ein Ausschreibungsdesign geachtet werden, dass eine hohe Effektivität anreizt. So sollte beispielsweise auf die endogenen Mengenanpassungen im Rahmen der Ausschreibungen zur Ausrichtung an das Wettbewerbsniveau verzichtet werden, da sie zu einer hohen Unsicherheit bei Investoren führt.
 - Die Ausweisung von ausreichend Flächen für den Bau von Windkraftanlagen an Land (zum Beispiel in Höhe von 2% des Bundesgebietes) sollte gewährleistet werden. So sollten beispielsweise die pauschalen Abstandsregeln überdacht und gegebenenfalls angepasst werden. Zudem sollten Träger der Regionalplanung bei der gerichtsfesten Ausweisung der Flächen unterstützt werden, Genehmigungsverfahren sollten beschleunigt werden und Arten- und Klimaschutz sollte aufeinander abgestimmt werden. Ferner sollten Windkraft und Flugsicherung besser abgestimmt werden.
 - Repowering wird in Zukunft deutlich an Bedeutung gewinnen. Aus diesem Grunde sollten administrative Hürden durch Beschleunigung und Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens bei Repowering abgebaut werden.
 - Optionen der Verzahnung von Elektrolysestandorten, in Norddeutschland, des Ausbaus der Netzinfrastruktur und der Anhebung der Ausschreibungsziele für Offshore- und Onshore-Wind sollten geprüft werden.
 - Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz sollten ergriffen werden, beispielsweise durch Bürgerdialoge mit
- frühestmöglicher Beteiligung. Zudem sind transparente Prozesse und finanzielle Beteiligung der Kommunen zentral, um die Gesellschaft mitzunehmen⁶.
- Aufgrund der in Kapitel 2 vorgeschlagenen Reduktion Strompreisbelastung ist grundsätzlich von einer besseren Vereinbarkeit von PV-Eigenstrom und Strommarkt auszugehen, da Vorteile für Eigenstrom reduziert werden. Die EEG-Förderung/Degression für Dachanlagen ist an diese Rahmenbedingungen und den real erzielten PV-Zubau anzupassen. Zusätzlich kann eine PV-Nutzungspflicht bei Dachsanierung, Anpassung der Auktionen für mittelgroße Dachanlagen und ein attraktiveres Mieterstrommodell für Mehrfamilienhaus-Eigentümer weitere Impulse liefern.
 - Das Segment der PV-Freiflächenausschreibungen ist auf die Fortschritte im Dachflächen- und Onshore-Windbereich flexibler anzupassen. Anlagen, die über nachhaltige Stromlieferverträge (Power Purchase Agreements) finanziert werden, können zusätzlich zum Erneuerbaren-Energien-Gesetz im Bereich des Ökostrommarktes neue Impulse setzen.
 - Durch Elektrodenkessel in der Industrie (siehe Kapitel 5), sowie die Reduktion der Stromkostenbestandteile und die Dynamisierung der Netzentgelte ist eine Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien statt Abregelung möglich.
 - Steinkohle-Kraftwerke, die CO₂-Preis-bedingt aus dem Markt gehen, können in der Netzreserve weiter genutzt werden (Versorgungssicherheit).



**Wärmewende: Sanie-
rung, Wärmepum-
pen und Wärmenet-
ze als Schlüssel zu
einem klimaneutralen
Gebäudebestand.«**

4. Wärmewende

Die Wärmewende hin zu Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 erfordert eine sofortige Neuorientierung in der Wärmeversorgung und die Beschleunigung der Sanierungsmaßnahmen in allen Gebäudekategorien. Um eine Reduzierung von 120 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen in 2020 auf 67 Mio. Tonnen CO₂-Emissionen in 2030 zu erreichen, sind erhebliche kurzfristige Maßnahmen im Heizungsmarkt notwendig. Ein möglicher, zielkompatibler Transformationspfad für die Heizungssysteme in Gebäuden unter Berücksichtigung des heutigen Bestandes einschließlich Altersstruktur ist im Folgenden dargestellt. Ein zentrales Ergebnis ist der parallele Ausstieg aus allen Ölkesseln (bis

Drittel wird durch Strom bereitgestellt. Potenzielle Emissionen fallen dann im Stromsektor an, dessen Erzeugung langfristig vollständig aus erneuerbarem Strom gedeckt werden muss. Gleichzeitig müssen die Potenziale der Nah- und Fernwärme, wo möglich, ausgebaut werden. Dies sollte mit einer Dekarbonisierungsstrategie der Fernwärme unter Nutzung hoher Anteile von Wärmepumpen, Solarthermie, Geothermie, Biomasse und Abwärme verbunden sein. Die Nutzung von Wasserstoff und grünen, synthetischen Gasen kann nach 2030 eine zusätzliche Möglichkeit darstellen, insbesondere in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung in größeren Gebäuden. Für die Erreichung des CO₂-Minderungsziels im Gebäudesektor im Jahr 2030 wird der Beitrag voraussichtlich allerdings gering sein.

» Wärmepumpen, Tiefengeothermie und Fernwärme werden in Zukunft die dominierenden Heizungstechnologien im Gebäudesektor darstellen. «

Von den Erneuerbaren Energieträgern besitzt in erster Linie die grundlastfähige Geothermie das Potenzial zum Ersatz fossiler Energieträger bei der Erzeugung von großen Wärmemengen für die erhöhten Temperaturniveaus von Fernwärmesystemen. Insbesondere in den Großstädten ist die Nutzung des tiefen Untergrunds eine wichtige Option, da der Flächenbedarf an der Oberfläche derartiger Einrichtungen im innerstädtischen und stadtnahen Raum im Vergleich zu alternativen Lösungen sehr gering ist.

2040) und mit Erdgas gefeuerten Kesseln (bis 2045) unter der Annahme, dass eine Umstellung auf CO₂-freie synthetische und biogene Energieträger nicht wirtschaftlich sinnvoll beziehungsweise aufgrund mangelnder Verfügbarkeit nicht möglich ist. Angesichts des großen Bedarfs an klimaneutralen, stofflichen Energieträgern in anderen Sektoren wie der Industrie, der Luftfahrt und dem Güterverkehr erscheint eine solche Annahme nicht unrealistisch. Dies bedeutet unter Berücksichtigung der Standzeiten faktisch einen Einbaustopp beider Technologien innerhalb der nächsten zehn Jahre (bei Ölkesseln früher).

Um zeitlichen und räumlichen Disparitäten von Verbrauch und Energiebereitstellung entgegenzutreten, müssen neben der Erzeugung zusätzliche Speichermöglichkeiten für Wärmeenergie auf mehreren Größenskalen geschaffen werden. Daher bietet sich – zusätzlich zu Übertagespeichern – der von Wasser durchsetzte Untergrund im Bereich großer industrieller und kommunaler Abnehmerstrukturen in idealer Weise als saisonales Puffersystem an.

Bis 2030 müssen entsprechend mindestens 6 Mio. Wärmepumpen installiert werden. Ein Großteil der gelieferten Wärme entstammt der Umgebung (Umweltwärme) und ungefähr ein

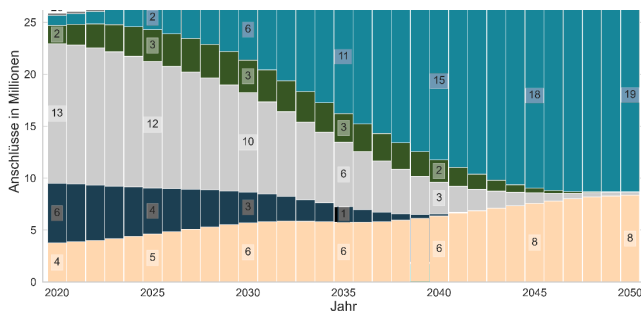


Abbildung 3: Mögliche Entwicklung der Wärmeversorgungssysteme von Gebäuden mit dem Ziel eines THG-neutralen Gebäudebestandes in 2050

Aus den oben genannten Zielstellungen und daraus abgeleiteten Ergebnissen für einen klimaneutralen Gebäudebestand ergeben sich die folgenden zentralen Handlungsfelder:

- Kurzfristige Steigerung der energetischen Sanierungsrate auf über 1,5 % pro Jahr
- Steigerung der mittleren Sanierungstiefe (Anforderungen an die energetische Qualität der Gebäudehülle)
- Errichtung von Neubauten nur noch mit ambitioniertem energetischem Standard (zum Beispiel kfW55)
- Energieträgerwechsel von fossilen Brennstoffen auf Strom (Wärmepumpen) beim Austausch von Heizungsanlagen
- Ausbau und Dekarbonisierung von Nah- und Fernwärme bei einer Verdreifachung der aktuellen Ausbaurrate (mit einer Umrüstung von fossilen Heizkraftwerken zu Multi-Quellen-Systemen mit Großwärmepumpen, Geothermie und weiteren Wärmequellen wie Abwärme und Solarthermie; dafür Erschließung von Potenzialen der Tiefengeothermie, insbesondere in großstädtischen Räumen).

Trotz einer Vielzahl an Beratungs- und Förderprogrammen, regulatorischen Anforderungen (beispielsweise im Rahmen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG, 2020) und der Einführung der CO₂-Bepreisung für Verkehr und Wärme ab 2021, ist die aktuelle Geschwindigkeit der Wärmewende unzureichend.

Es stellt sich die Frage, mit welchen Instrumenten die Klimaziele des Gebäudesektors unter Betrachtung der Vielzahl an Herausforderungen sowie ökonomischer und sozialer Aspekte erreicht werden können. Zur Adressierung dieser Maßnahmen liegt bereits eine vielfältige und umfangreiche Instrumentenlandschaft vor. Aufgrund der heterogenen Akteursstruktur im Gebäudesektor sowie der Vielzahl an Instrumenten, gestaltet sich die Wahrung von Übersichtlichkeit und einem konsistenten Wirken der Instrumente miteinander als herausfordernd – vereinzelt wirken diese derzeit konträr. Die Weiterentwicklung existierender und/oder die Einführung zusätzlicher Instrumente sowie eine Harmonisierung dieser Instrumente zur Umsetzung der Maßnahmen ist dementsprechend für eine sozialverträgliche und mit den Klimazielen kompatible Wärmewende von zentraler Bedeutung.

Um die neuen Klimaschutzziele bis 2045 zu erreichen und die Wärmewende zielführend über 2030 bis 2045 zu vollziehen, ist aufgrund der beschriebenen Komplexität die Festlegung eines Entwicklungspfades des CO₂-Preises nicht hinreichend. Vielmehr ist zusätzlich ein Mix aus ordnungsrechtlichen Instrumenten, Beratungs- und Informationsmaßnahmen sowie angepassten und zielkonformen Förderungen notwendig.

Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben und Maßnahmen für die nächste Legislaturperiode:

- **In der Kategorie der Steuern und Abgaben wird ein zentraler Treiber für einen Energieträgerwechsel der steigende CO₂-Preis von 65 EUR/t auf über 100 EUR/t bis 2030 sein.** Einhergehend mit einer frühzeitigen Kommunikation dieser Preispfade und einer entsprechenden Strompreisstabilisierung durch ein Abschmelzen der EEG-Umlage soll insbesondere die Nutzung von Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie in Wärmenetzen vorangetrieben werden. Als Ergänzung zur CO₂-Bepreisung bei einem niedrigen Preispfad könnte für den Gebäudesektor eine Gebäudeklimaabgabe eingeführt werden, die sich an der Differenz zwischen dem energetischen Standard des Gebäudes sowie einem Zielwert (Benchmark) bemisst. Der Zielwert könnte bei Übererfüllung zugleich als Grenze für einen Rechtsanspruch auf Förderung dienen.



Ein weiteres fiskalisches Instrument stellt die Berücksichtigung der Energieeffizienz des Gebäudes in der Grundsteuer und Grunderwerbssteuer dar, das insbesondere bei Eigentümerwechsel wirksam wird.

■ **Eine Weiterentwicklung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) stellt in der Kategorie Ordnungsrecht ein wichtiges Instrument dar.** In einer Neufassung sollten folgende Aspekte geändert werden: (i) Umstellung auf CO₂ als Bewertungsmaßstab für die Erfüllung von Anforderungen sowie die Umstellung der Emissionsfaktoren auf die während der Betriebsphase zu erwartenden CO₂-Emissionen (ii) Weiterentwicklung der Anforderungen der Nutzungspflicht für erneuerbare Wärmeversorgung auf bestehende Gebäude. (iii) Im GEG wird bereits der Einbau von Öl- und Kohleheizungen verboten, jedoch gelten weitreichende Ausnahmeregelungen. Unter Berücksichtigung der Lebensdauer von Heizungen stellt sich die Frage, inwiefern ein solches Verbot perspektivisch auch auf z.B. Gasheizungen ausgeweitet werden muss bzw. kann^{1 2 3}.

■ Für den Ausbau der netzgebundenen Wärmeversorgung stellt ordnungsrechtlich die Einführung einer **verpflichtenden, strategischen kommunalen Wärmeplanung** dar, um die langfristigen Investitionen in Infrastrukturen richtig zu steuern und anzureizen⁷. Das in der Wärmelieferverordnung (WärmelV) geforderte Verfahren zur Darstellung der Kostenneutralität bei Umstellung auf einen Wärmeliefervertrag sollte dahingehend ergänzt werden, dass bei Umstellung auf eine CO₂-arme Versorgung eine begrenzte Kostensteigerung zulässig wird. Zusätzlich ermöglicht die Einführung eines Warmmietenmodells das Mieter-Vermieter-Dilemma aufzulösen. Während die aktuelle Diskussion lediglich eine Kostenteilung des zusätzlichen CO₂-Preises des BEHG betrifft, sind die CO₂-Vermeidungskosten aus Sicht eines Vermieters ungleich höher. Die Wirksamkeit von Warmmieten anstatt der in Deutschland etablierten Kaltmieten ist in Schweden empirisch belegt⁸, und ist in Verbindung mit einem Referenztemperaturmodell grundsätzlich mit den Vorgaben der Energieeffizienzrichtlinie (EED) vereinbar⁹.

■ **Förderinstrumente:** Jegliche Förderungen für nicht zielkonforme Technologien (alle Technologien mit CO₂-Emissionen, beispielsweise auch Gasbrennwertkessel) sind zu streichen. Die Ausgestaltung der Förderung für Sanierungs- und

Effizienzmaßnahmen sind direkt auf die zielkonformen Technologien und Lösungen anzupassen. Die Höhe der möglichen Fördersumme für Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz und des Einsatzes von EE-Wärmetechniken könnte an Einkommen oder Vermögen gekoppelt sein; dadurch würden öffentliche Gelder vornehmlich für diejenigen genutzt werden, die sich entsprechende Maßnahmen anderweitig finanziell nicht leisten könnten.

■ In den Bereich der **informativischen Instrumente** fallen Maßnahmen zur Behebung des Fachkräftemangels. Dieser Mangel in Handwerk, Planung und Heizungsindustrie erschwert die Umsetzbarkeit der Wärmewende beziehungsweise seine Beseitigung ist eine Voraussetzung für das Gelingen. Deshalb sollten Maßnahmen getroffen werden, um die Verfügbarkeit von entsprechenden Fachkräften zu erhöhen, wie zum Beispiel Nachwuchs- und Umschulungsprogramme, Maßnahmen zur Erhöhung der Attraktivität der Berufe durch Gleichwertigkeit der Abschlüsse. Ein weiterer Fokus sollte die Anpassung der Aus- und Weiterbildungsprogramme von Handwerker:innen hinsichtlich der zielkonformen Technologien sein.

■ Durch gezielte Aktivitäten im Bereich von Forschung, Entwicklung und Demonstration gilt es insbesondere die Anwendbarkeit von Tiefengeothermie und Wärmepumpen systematisch weiter auszubauen (höhere Temperaturen, Erschließung variabler Wärmequellen, Minimierung von Schallemissionen, breite Leistungsbereiche für alle Gebäudetypen für Wohnen und Gewerbe).



»»
**Industriewende:
Ein klarer Rahmen
ermöglicht der
Industrie Investitio-
nen in CO₂-neutrale
Produktionstechniken.«**

5. Industriegewende

Das Industrie-Sektorziel des neuen Klimaschutzgesetzes verlangt schnelles und tiefgreifendes Handeln. Die anvisierte Reduktion der THG-Emissionen von 186 Mt. im Jahr 2020 auf 118 Mt. bis zum Jahr 2030 steht in starkem Kontrast zu den in der letzten Dekade in etwa stagnierenden Emissionen im Industriesektor.

Die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Produktion erfordert strategische Investitionen, die im Einzelfall sehr hoch sein können und ausschlaggebend für die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Unternehmen sind. Solange die Richtung der Industriegewende unklar ist und entsprechende Investitionen

oder Power-to-Gas liegt näher beieinander als in den Sektoren Gebäude und Verkehr, da die Elektrifizierung der Prozesswärme nicht mit den großen Effizienzgewinnen von Wärmepumpen und Elektroautos einhergeht. Entsprechend können sich die Technologiepfade abhängig von Technologiereife oder regionaler Anbindung zwischen den Branchen und Unternehmen unterscheiden.

Die Grundstoffindustrien Stahl, Zement und Chemie sind für die Industriegewende entscheidend. Sie zeichnen sich durch besonders hohen Energieverbrauch und CO₂-Emissionen aus. Einige Prozesse verursachen Emissionen, die über den Wechsel auf Erneuerbare Energien nicht vermieden werden. Eine Transformation hin zu einer CO₂-neutralen Industrieproduktion kann nur gelingen, wenn für diese Branchen Lösungen gefunden und zügig umgesetzt werden.

Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben und Maßnahmen für die nächste Legislaturperiode:

■ **Die Bundesregierung sollte für die Stahlindustrie eine klare Perspektive für den zeitnahen Umbau hin zu einer CO₂-neutralen und wasserstoffbasierten Stahlproduktion schaffen.** Die Bundesregierung spricht sich klar dafür aus, langfristig und klimaneutral Stahl in Deutschland zu produzieren¹⁰. Für die technologische Transformation zu einer CO₂-neutralen Stahlherstellung ist der Wechsel auf das Verfahren der Direktreduktion von Eisenerz mittels Wasserstoff (H₂-DRI) der vielversprechendste Weg¹¹. Das Verfahren ist technologisch bereits ausgereift und wird im industriellen Maßstab eingesetzt¹².

» Die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Produktion erfordert strategische Investitionen, die ausschlaggebend für die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Unternehmen sind. «

keine erkennbare und verlässliche Perspektive zur Wirtschaftlichkeit haben, können Unternehmen nur begrenzt investieren und die Industriegewende bleibt auf dem Niveau von kleinskaligen Pilot- und Demoanlagen stehen. Gleichzeitig stehen in den kommenden Jahren bei vielen Anlagen der Grundstoffindustrie Modernisierungen oder Reinvestitionen an. Diese können ein Gelegenheitsfenster für die Transformation bieten, bergen aber aufgrund langer Anlagenlebensdauer auch die Gefahr von Fehlinvestitionen und Lock-ins in CO₂-intensive Produktionsstrukturen.

Die Transformation der Industrie wird große Mengen CO₂-neutraler Energieträger benötigen. Der Lösungsraum der alternativen Technologien Elektrifizierung, Wasserstoff



Der benötigte Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur sollte u.a. an den zukünftigen Standorten für H₂-DRI-Anlagen ausgerichtet werden und zeitnah Planungssicherheit zur lokalen Anbindung schaffen.

■ **Gelegenheitsfenster durch anstehende Modernisierungen von Hochöfen sollten genutzt werden.** Aufgrund anstehendem Modernisierungsbedarf an mehreren Hochöfen bieten sich bereits in diesem Jahrzehnt Gelegenheitsfenster für die Investition in über 10 Mio. Tonnen H₂-DRI-Produktionskapazität. Größere Investitionen in fossile Verfahren mit langen Lebensdauern sollten vermieden werden.

■ **Die Nutzung von Erdgas für neu errichtete DRI-Anlagen im Übergangszeitraum bringt Flexibilität und senkt das Investitionsrisiko.** Gleichzeitig werden dadurch hohe THG-Minderungen von über 60% im Vergleich zur Verwendung von Kohle in Hochöfen erreicht. Erdgas kann jedoch nur eine Übergangslösung sein: Sobald genügend grüner Wasserstoff verfügbar ist sollte dieser für die CO₂-neutrale Stahlherstellung genutzt werden.

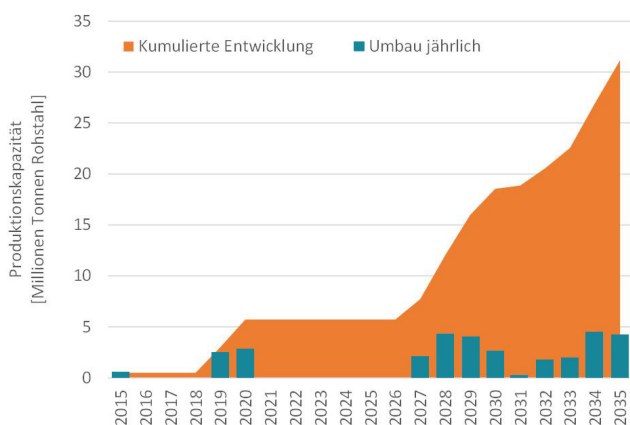


Abbildung 4: Theoretischer Reinvestitionsbedarf von Hochöfen bei Annahme von 20-Jahre Modernisierungszyklen

■ **Die Bundesregierung sollte eine Perspektive für die Abscheidung sowie Speicherung von CO₂ aus der Zementindustrie erarbeiten.** Die Zementindustrie

hat momentan keine Perspektive zur CO₂-Neutralität: Die Abscheidung und Speicherung von CO₂ (CCS) ist derzeit die einzige technisch weit ausgereifte Option mit großem Minderungspotenzial. Ohne diese Schlüsseltechnologie scheint eine CO₂-neutrale Zementproduktion bis zum Jahr 2045 nicht möglich. Alternative Optionen sind entweder sehr weit von der Marktreife entfernt oder weisen hohe Restemissionen auf. CCS ist jedoch gesellschaftlich nicht akzeptiert, weshalb in der Zementindustrie in Deutschland keine großskaligen Investitionen in CCS getätigt werden.

■ **Eine gesellschaftliche Diskussion um den Einsatz von CCS für die Abscheidung von anderweitig nur schwer vermeidbaren Emissionen aus der Zementherstellung (und anderen Branchen), verbunden mit einer Offshore-Speicherung in der Nordsee ist nötig.** Diese Diskussion sollte jedoch ganz klar den Einsatz von CCS zur Verlängerung der Lebensdauer von Kohlekraftwerken ausschließen. Eine Alternative zu CCS kann langfristig CCU, also die Nutzung des abgeschiedenen CO₂ sein. Kurz- und mittelfristig gibt es jedoch nach jetzigem Stand keine Einsatzmöglichkeiten, welche große Mengen CO₂ aus der Zementherstellung nutzen und über einen langen Zeitraum speichern würden. CCU sollte dennoch mit Nachdruck weiter erforscht werden. Hinsichtlich einer CO₂-Infrastruktur ergeben sich hohe Synergien mit CCS.

■ **Eine Strategie hin zur CO₂-neutralen Chemieindustrie sollte die rohstoffliche Verwendung von Energieträgern berücksichtigen.** Die Grundstoffchemie verwendet große Mengen fossiler Energieträger für die Bereitstellung von Prozesswärme, sowie als Rohstoff für Produkte wie zum Beispiel Kunststoffe oder Ammoniak. Wie in der Stahlherzeugung sind der Zugang zu Wasserstoff und verlässliche Investitionsperspektiven zentral. Gleichzeitig besteht eine größere Vielfalt an technischen Lösungen, die auch nebeneinander existieren können.

■ **Die Abkehr von fossilen Produktionsverfahren verändert die Wertschöpfungskette der Petrochemie massiv.** Raffinerien verlieren auch als Lieferant von stofflich genutzten Kohlenwasserstoffen (Naphtha) an Bedeutung. Eine wasserstoffbasierte Chemie benötigt dennoch Kohlenstoff. Wird dieser zum Beispiel über CO₂-Abscheidung und -Nutzung (CCU) bereitgestellt, ist ein geschlossener Stoffkreislauf zu



etablieren. Gegebenenfalls Kann ein Import vor Vorprodukten zum Beispiel von grünem Ammoniak und Methanol Emissionen in Deutschland vermeiden. Damit würde aber auch der Verlust der Wertschöpfung einhergehen.

■ **Für die Dekarbonisierung der Prozessdampferzeugung sollte die Bundesregierung die Elektrifizierung zügig voranbringen.** Prozessdampf macht in etwa 20% des Energieverbrauchs der Industrie aus und wird vorwiegend über Erdgas erzeugt. Mit dem Elektrodenkessel ist eine Technologie verfügbar, die eine CO₂-neutrale Dampferzeugung erlaubt. Ihre Wirtschaftlichkeit hängt von der Differenz zwischen Erdgas- und Strompreis ab¹¹. Die Bundesregierung sollte die Marktdiffusion von Elektrodenkesseln beschleunigen. Diese können zunächst in bivalenten Systemen abhängig vom Strompreis flexibel genutzt werden und so zur Marktintegration von Erneuerbaren Energien beitragen. Dafür müssen regulatorische Hemmnisse für die Teilnahme am Strommarkt abgebaut werden. Die Umstellung zu einer vollständig CO₂-neutralen Produktion kann dann kontinuierlich erfolgen und verlangt nur geringe zusätzliche Investitionen. Im Niedertemperaturbereich können Wärmepumpen effizient und wirtschaftlich fossile Systeme ersetzen.

■ **Die Transformation hin zu einer CO₂-neutralen Industrieproduktion kann nur gelingen, wenn sie mit einer grundsätzlichen Ausrichtung am Ziel einer material- und energieeffizienten Kreislaufwirtschaft einhergeht.** Diese betrifft sowohl sämtliche Zwischenschritte in der gesamten Wertschöpfungskette, wie auch die Endverbrauchssektoren. Die Bundesregierung sollte einen klaren Rahmen festlegen und zunächst den Schwerpunkt auf die CO₂-intensiven Grundstoffe wie Stahl, Zement und Kunststoffe legen.

Ein starker CO₂-Preis des EU-Emissionshandels sollte das Leitinstrument sein, muss aber durch weitere neue Instrumente ergänzt werden. Der jetzige CO₂-Preismechanismus birgt hohe Unsicherheiten und der Preis ist derzeit zu niedrig, um CO₂-neutrale Herstellungsverfahren konkurrenzfähig zur fossilen Alternative zu machen. Die Bundesregierung sollte den CO₂-Preis des EU Emissionshandels um einen Mindestpreisfad ergänzen. Dieser erlaubt Unternehmen, frühzeitig zu investieren und zukünftige höhere CO₂-Preise zu antizipieren, schafft so die benötigte Investitionssicherheit. CO₂-Differenzverträge

(Carbon Contracts for Difference - CCfDs) schließen die Wirtschaftlichkeitslücke für strategisch wichtige Technologien und ermöglichen zeitnahe Investitionen.

Aufgrund der langen Lebensdauer von Anlagen dürfen nur solche Anlagen gefördert werden, die langfristig CO₂-neutral betrieben werden können.

■ **Grüne Leitmärkte etablieren die Nachfrage nach CO₂-armen Lösungen und ergänzen angebotsseitige Instrumente.** Diese Leitmärkte können über verschiedene Maßnahmen etabliert werden. Dazu zählen eine Kennzeichnungspflicht besonders CO₂-intensiver Zwischen- und Endprodukte, die Berücksichtigung der Lebenszyklus-Emissionen bei Neubau und Sanierung von Gebäuden und Infrastrukturen, die öffentliche Beschaffung sowie Quoten für den Einsatz CO₂-armer Materialien.

■ **Ein steigender CO₂-Preis in Kombination mit einer sinkenden freien Zuteilung für Industrieunternehmen verlangt Maßnahmen zum Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und zur Vermeidung von Abwanderung** (Carbon Leakage) in Länder mit niedrigeren CO₂-Preisen. Ein entsprechender Mechanismus kann ein CO₂-Grenzsteuerausgleich sein (Carbon Border Adjustment).



**Verkehrswende: CO₂-
armer Verkehr ist mög-
lich, erfordert aber
schnelles, klares und
ehrgeiziges Handeln.«**

6. Verkehrswende

Im Verkehr ist die Herausforderung zur Emissionsenkung erheblich und es ist der einzige Sektor, in dem die Emissionen in den letzten Jahren nicht gesunken sind. Es gab zwar erhebliche Fortschritte in der Effizienz der Antriebe aber sämtliche Effizienzsteigerungen wurden (bis auf Sondereffekte im Corona-Jahr 2020) durch eine steigende Verkehrsleistung vor allem auf der Straße überkompensiert. Ein Vorteil im Verkehr ist allerdings, dass die Handlungsmöglichkeiten und Technologien für eine schnelle Emissionsreduktion bekannt und vorhanden sind.

Entscheidend für die Erreichung der ambitionierten Ziele gemäß Klimaschutzgesetz wie eine Reduktion der Emissionen auf 85 Mt CO₂

» Eine klare Entscheidung zugunsten von Elektrofahrzeugen macht Europa zum Vorreiter für einen emissionsarmen Straßenverkehr. «

im Jahr 2030 und ein triebhausgasneutraler Verkehr bis 2045 sind die schnelle Einführung und Umsetzung ambitionierter Politikmaßnahmen. Im Verkehr müssen wirklich alle Register zur Emissionsreduktion gezogen werden, angefangen mit Verkehrsvermeidung durch mehr Homeoffice und weniger Dienstreisen, über Verkehrsverlagerung durch Anreize für einen schnellen und deutlichen Umstieg auf Bus, Bahn und Rad sowie schließlich durch eine Verbesserung mittels der schnellen Verbreitung effizienterer Verbrenner und Elektro-Pkw und -Lkw.

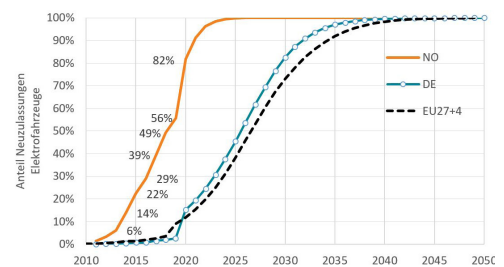


Abbildung 5: Historischer Verlauf und Prognose des Anteils Neuzulassungen Elektrofahrzeuge in Norwegen, Deutschland und Europa.

Abbildung 5 zeigt exemplarisch, wie schnell die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen in Europa auf 75% steigen könnten, in Deutschland sogar noch darüber hinaus.

Dafür wurde die aktuelle Marktentwicklung fortgeschrieben und angenommen, dass existierende Anreize für die Elektromobilität weiter bestehen bleiben. Der Markt ermöglicht somit ambitioniertere Reduktionsziele über den Verkauf von Pkw und alle Hersteller arbeiten derzeit an einer sehr schnellen und starken Verbreitung von Elektro-Pkw.

Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben und Maßnahmen für die nächste Legislaturperiode:

- **Das begrenzte CO₂-Emissionsbudget bedeutet eine schnelle Umstellung der Fahrzeugflotte auf emissionsfreie Fahrzeuge.** Bei Pkw sind Elektrofahrzeuge schon heute in großer Stückzahl und Modellvielfalt verfügbar und die direkte Nutzung von Strom in Pkw und Lkw ist ökonomisch klar die günstigste Option. Ein Ausstiegsdatum für verbrennungsmotorische Fahrzeuge haben viele Länder und Regionen weltweit schon beschlossen und wird derzeit auch für die EU



diskutiert¹⁷. Ein klares Ausstiegsdatum bedeutet Planungs- und Investitionssicherheit für die Industrie und macht klar, dass die schnelle Verbreitung von Elektrofahrzeugen und emissionsarmen Kraftstoffen unumkehrbar ist und politische Unterstützung erfährt. Mit einem THG-Budget zur Begrenzung der Erwärmung auf ein 1,5 °C Ziel wäre ein Ausstiegsdatum bis 2030 oder spätestens 2033 notwendig.

■ **Die Bundesregierung sollte die Einführung ambitionierter Flottengrenzwerte für Pkw und Lkw in Europa klar unterstützen.** Elektrofahrzeuge werden sich weltweit durchsetzen und eine klare Entscheidung zugunsten von Elektrofahrzeugen verringert Fehlinvestitionen in der Industrie und macht Europa zum Vorreiter für einen emissionsarmen Straßenverkehr. Für Elektro-Pkw und -Lkw muss der Ausbau der Ladeinfrastruktur weiter ambitioniert verfolgt werden.

■ **Im Flugverkehr und der Schifffahrt ist die langfristige Förderung im Bereich von synthetischen THG-neutralen Kraftstoffen sowie die Festlegung von Mindestquoten für solche Kraftstoffe zentral.** Die Mindestquoten sorgen zudem für Planungs- und Investitionssicherheit und bewirken eine schnelle Umsetzung in der Praxis.

■ **Der Umstieg auf emissionsarme Verkehrsmittel wie Bahn, Fahrrad oder Elektrofahrzeuge kann durch Preissignale und verbesserte Angebote gesteuert werden.** Hier steht eine deutliche Reduktion klimaschädlicher Subventionen im Verkehr im Vordergrund - wie die Abschaffung des Dieselprivilegs, die Reduktion der Pendlerpauschale oder die Anpassung der Steuervorteile von Dienstwagen.

■ **Bei den kurzfristigen Maßnahmen sticht die Einführung eines bundesweiten Tempolimits von 130 km/h auf Autobahnen als besondere Maßnahme hervor.** Hierfür ist nur eine Änderung der Straßenverkehrsordnung notwendig und aus wissenschaftlicher Sicht hat diese Obergrenze viele Vorteile: neben der CO₂-Minderung auch eine Reduktion von Unfällen und Todesfällen. Eine solche Regelung reduziert Lärm und Abgase und bewirkt auch einen höheren und gleichmäßigeren Verkehrsfluss und damit die Reduktion von Stau.

■ **Die Infrastruktur für nachhaltigen Verkehr muss weiter ausgebaut werden.** Dies umfasst den Ausbau und die Digitalisierung des Schienenverkehrs, aber auch die Schnellladeinfrastruktur für Elektro-Pkw und -Lkw. Der (Aus-)Bau von Radwegen bzw. die Umwandlung von Straßenspuren in Radwege kann vor allem in Städten erheblich zur Reduktion des Pkw-Verkehrs und mehr Rad- und Fußverkehr führen.

■ **Das Personenbeförderungsgesetz sollte geöffnet werden, um neue Mobilitätsformen wie neuartige Fahrgemeinschaften (beziehungsweise car sharing, ride pooling und ride hailing) in größerer Form zuzulassen und voran zu bringen.** Damit würde der multimodale Verkehr gefördert und private Motorisierung gemindert.

In Summe sind die Herausforderungen und der Handlungsbedarf im Verkehr groß. Aber es stehen neue Technologien und viele Möglichkeiten zur Verfügung, um nicht nur die CO₂-Emissionen zu senken, sondern die verschiedenen Umweltwirkungen des Verkehrs zu reduzieren und dabei die Städte attraktiver zu machen und Teilhabe zu vergrößern¹⁸.



Infrastrukturen: Energieinfrastrukturen brauchen Planungssicherheit und systemische Ansätze.«

7. Infrastrukturen

Die bisherigen Ansätze zur Planung von Infrastrukturen sind den Herausforderungen der nächsten Phase der Energiewende nicht gewachsen. Energieinfrastrukturen wurden in der Vergangenheit oft »nur« als Bindeglied zwischen Nachfrage und Angebot betrachtet. So werden beispielsweise im Rahmen der Netzentwicklungspläne Nachfrage und Angebot für Strom und Erdgas getrennt für die nächsten Jahre abgeschätzt und daraus dann der Bedarf für Stromleitungen und Gasnetze abgeleitet. Das neue Klimaschutzgesetz erhöht dabei den Zeitdruck noch einmal deutlich. Bereits die Sektorziele für 2030 werden ohne substanzielle neue Infrastrukturen besonders für Strom, netzgebundene Wärme und Wasserstoff nicht zu erreichen sein. Da sich die Struktur der Energieversorgung und der Energieinfrastrukturen so grundlegend und schnell wandeln muss, sind neue Konzepte und Verfahren für die Infrastrukturplanung erforderlich.

Es bestehen »Henne-Ei-Probleme« bei Energienachfrage, -angebot und -infrastrukturen.

Um die Infrastrukturen zu schaffen, mit denen in weniger als 25 Jahren die Energieversorgung treibhausgasneutral erfolgen kann, können deren Planung und Ausbau nicht mehr reaktiv oder mit nur wenigen Jahren Vorausschau erfolgen. Viele Energieerzeuger und -nachfrager können erst auf klimafreundliche Energieträger ausweichen, wenn die Infrastrukturen entsprechend ausgebaut sind. Einfach ausgedrückt: Wir können nicht darauf warten, dass Elektrolyseure errichtet werden, um dann mit der Planung eines Wasserstoffnetzes zu beginnen, und wir sollten nicht darauf warten, dass Wärmepumpen und Elektromobilität zu Engpässen im Stromnetz führen, um das Netz zu ertüchtigen. Infrastrukturplanung und -ausbau muss proaktiv darauf ausgerichtet werden, die erforderlichen neuen Nachfragen zu bedienen und neue Angebot zu integrieren.

Die Planung der Energieinfrastrukturen erfordert eine integrierte Gesamtstrategie der Energiewende über alle Sektoren hinweg.

Es ist nicht möglich, Infrastrukturen für alle Energieträger voll auszubauen, damit sich dann am Markt die effizienteste Lösung durchsetzt. Stromnetze, Wärmenetze für urbane Räume, Wasserstoff für die Industrie: Weil so viele der Optionen der Energiewende Infrastrukturen benötigen,

braucht es eine Systementwicklungsstrategie. Diese muss auf eine langfristige Perspektive zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele ausgerichtet sein und dabei klar herausarbeiten, welche Infrastrukturen benötigt werden. Für Transport- und Verteilnetze sind sektorenübergreifende, integrierte Planungswerkzeuge und -prozesse erforderlich, auf deren Basis der effiziente Ausbau proaktiv umgesetzt werden kann. Dies bedeutet nicht, dass die Politik Infrastrukturen bis ins kleinste Detail planen muss. Es bedeutet vielmehr:

1. Wo heute bereits neue Infrastrukturanforderungen in der Zukunft klar erkennbar sind, müssen Infrastrukturbetreiber in der Lage oder sogar verpflichtet sein, die erforderlichen Investitionen vorzunehmen.
2. Für bestimmte Bereiche kann es erforderlich sein, lähmende Diskussion durch klare, verlässliche Vorgaben zu beenden. Kommunale Versorger können zum Beispiel ihre Aufgaben mit unterschiedlichen Energieträgern erfüllen. Die Unklarheit darüber, welche davon ab wann und zu welchen Kosten vor Ort verfügbar sein werden, schafft für die Akteure unnötige Risiken und lähmt die Transformationsprozesse. Hier sollten transparente Abschätzungen und Planungen von offiziellen Stellen die Unsicherheit minimieren^{1 2 3}.
3. Für alle zukünftigen Infrastrukturprojekte muss klar gezeigt werden, dass diese im Einklang mit der deutschen Energie- und Klimastrategie stehen. Investitionen in fossile Brückenslösungen sind mit den ambitionierten Zielen kaum zu vereinbaren und sollten nur in sehr gut begründeten Einzelfällen genehmigt werden.
4. In den Bereichen, wo die Lösungen für die Zukunft explizit noch nicht klar absehbar sind, dürfen ausbleibende Infrastrukturinvestitionen nicht »Pfade verschließen«. Es braucht daher Entscheidungen, welche Strategien offengehalten werden können und sollen, indem die dafür erforderlichen Infrastrukturen geplant und zukünftig errichtet werden. Der bisherige Ansatz, Transportkapazitäten getrennt voneinander zu planen und dabei nur Investitionen in No-regret Maßnahmen zu ermöglichen, birgt die Gefahr, dass fehlende Investitionen in Infrastrukturen zu gewichtigen Engpässen führen.



Daraus ergeben sich die folgenden Aufgaben und Maßnahmen für die nächste Legislaturperiode:

■ **Wärmenetze in urbanen Räumen:** Wärmenetze sind aus verschiedenen Gründen für das Gelingen der Energiewende essenziell. Sie ermöglichen die klimaneutrale Versorgung großer Wärmenachfragen für unterschiedliche Anwendungen, für die lokale Optionen nicht oder nicht schnell genug zu Verfügung stehen. Die Wärmebereitstellung kann kosteneffizient mit Großwärmepumpen erfolgen, die je nach lokalen Potenzialen durch Abwärme aus der Industrie, Geothermie, Solarthermie und gegebenenfalls Kraft-Wärme-Kopplung mit erneuerbaren Energieträgern ergänzt werden können. In thermischen Speichern können EE-Überschüsse kostengünstig auch über längere Zeiträume gespeichert werden. Wärmenetze sind daher auch für die Flexibilisierung des Stromnetzes eine wichtige Option. Bestehende Wärmenetze sollten daher verdichtet werden und der Neubau in dafür geeigneten Wohnstrukturen vorangetrieben werden.

■ **Stromübertragungsnetze:** Das neue Klimaschutzgesetz erhöht den EE-Strombedarf und erfordert einen zügigeren Ausbau der Stromnetze. Zumindest in den nächsten Jahren erscheint eine substanzielle Erhöhung des Übertragungsnetzausbaus über die bereits geplanten Maßnahmen hinaus jedoch kaum realisierbar. Daher ist es wichtig, auch vorhandene Flexibilitätspotenziale auf der Angebots- und Nachfrageseite zu erschließen.

■ **Stromverteilnetze:** Prinzipiell sind Stromverteilnetze in Deutschland zwar gut ausgebaut, allerdings wird sich der Leistungsbedarf durch Wärmepumpen, Elektromobilität und Photovoltaik zumindest mittel- und langfristig erhöhen. Darum ist es wichtig, dass Netzbetreibern die Möglichkeit gegeben wird, zukünftige Stromnachfragen für Elektromobilität und Wärmepumpen zu berücksichtigen. Wird eine Leitung ertüchtigt, ist zusätzliche Leistung günstig, eine spätere Leistungserhöhung durch Wiederaufgraben wird jedoch teuer.

■ **Wasserstoffnetze und -speicher:** Das von den Gas-Fernleitungsnetzbetreibern bisher vorgeschlagene H₂-Transportnetz ist eine gute Diskussionsgrundlage für die erste Phase des Aufbaus eines Wasserstoffnetzes. Allerdings sind zumindest die bisherigen Pläne für die ambitionierten Ziele der nationalen

Wasserstoffstrategie und des neuen Klimaschutzgesetzes noch nicht ausreichend. Außerdem fehlt eine integrierte Planung mit den Stromnetzen. Um insbesondere potenziellen H₂-Nutzern in der Industrie die nötigen Informationen für die anstehenden Entscheidungen zu geben, muss schnell entschieden werden, wann welche Nachfragen über das Wasserstoffnetz versorgt werden können. Außerdem muss geklärt werden, wie in den neuen Wasserstoffnetzen die nötige Flexibilität für eine sichere Versorgung bereitgestellt werden kann: Da Elektrolyseure für die Produktion von grünem Wasserstoff auf das schwankende EE-Dargebot angewiesen sind, werden Speicher, allen voran Kavernenspeicher, im Wasserstoffnetz von hoher Bedeutung sein. Weil Importe für die deutsche Wasserstoffstrategie bereits in 2030 einen wichtigen Pfeiler darstellen, müssen die möglichen Importrouten zügig festgelegt, geplant und umgesetzt werden und Handelspartner zum Beispiel über Energiepartnerschaften etabliert werden.

■ **Digitale Infrastruktur:** Das Energiesystem wird in Zukunft immer stärker darauf angewiesen sein, Schwankungen im Angebot durch nachfrageseitige Reaktion in Echtzeit auszugleichen. Hierfür ist eine gut ausgebaut digitale Infrastruktur unerlässlich.

■ **CO₂-Leitungen für CCS/CCU:**

Wie in den Empfehlungen für die Industrie bereits diskutiert wurde, gibt es einige Industrieprozesse, für die nach heutigem Kenntnisstand keine emissionsfreien Alternativen bestehen. Vollständige Treibhausgasneutralität lässt sich daher ganz ohne CCS vermutlich nicht erreichen. Wenn keine alternativen Maßnahmen gefunden werden, muss daher zeitnah mit Planungen begonnen werden, was mit den Emissionen aus diesen Prozessen geschehen soll. Dies beinhaltet auch die Planung von Infrastrukturen, die das anfallende CO₂ zum Ort ihrer Einspeicherung oder Verwendung transportieren.

Forschung und Entwicklung

Ein zentraler Fokus bei der Erreichung der Klimaziele bis 2030 liegt darin, einen Schub in der Marktdiffusion von Klimaschutztechnologien zu bewirken. Viele der in diesem mittelfristigen Zeitrahmen benötigten Technologien sind am Markt verfügbar, um die Transformation des Energiesystems von der Erzeugung über die Übertragung und Speicherung bis zur Nutzung beschleunigt weiterzuführen. Da Innovationsprozesse durch Rückkopplungen der Nutzung von Technologien auf die Generierung von Neuerungen geprägt sind, ist durch die Marktdurchdringung dieser Technologien auch eine wesentliche Steigerung der Innovationsgeschwindigkeit zu erwarten.

Es sind aber auch bei bereits etablierten Technologien weitere FE&I-Anstrengungen notwendig, um u.a. den Wirkungsgrad zu erhöhen, die Kosten und den Materialbedarf zu reduzieren sowie um das Systemverständnis und die Systemintegration zu verbessern. Bei den Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien sind weiterhin starke Kostenreduktionen für die Technologien Wind Offshore, Wind Onshore und Photovoltaik sowie für Wärmepumpen zu erwarten, die auch durch FE&I deutlich beschleunigt werden können. Weitere Bereiche, die durch starke Kostendegression aufgrund von Skaleneffekten und FE&I gekennzeichnet sein werden, sind beispielsweise energieeffiziente und automatisierte Gebäude und Querschnittstechnologien in der Industrie, elektrische Speicher für mobile und stationäre Anwendungen sowie integrierte und intelligente Energieinfrastrukturen und Quartiere.

Im Bereich der technologischen Innovationen besteht ein weiterer grundlegender FE&I-Bedarf insbesondere hinsichtlich folgender Elemente:

- Für die Erreichung der Treibhausgasneutralität sind noch einige Schlüsseltechnologien zur Marktreife zu bringen beziehungsweise weiterzuentwickeln, wie zum Beispiel:
 - Wasserstoffelektrolyse
 - Produktion synthetischer Brennstoffe, zum Beispiel E-Kerosin
 - Transport- und Speichertechnologien für Wasserstoff
 - Großwärmepumpen
 - Geothermie
 - Wärmenetze der nächsten Generation
 - Thermische Speicher
 - Wasserstoffeinsatz in Industrieöfen
 - Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff
 - Neue Materialien und biotechnologische Verfahren für Energietechnologien
 - CO₂-Abscheidung (inkl. Luftabscheidung), CO₂-Nutzung und CO₂-Speicherung

- Da zentrale Technologien der Energiewende, wie zum Beispiel PV- und Windkraftanlagen sowie Batterien, Elektrolyseure und Brennstoffzellen, einen hohen Materialbedarf von teilweise kritischen Rohstoffen aufweisen, muss die Reduktion des Rohstoffbedarfs durch verringerten Materialeinsatz oder durch Substitution von kritischen Materialien sowie das Recycling dieser Anlagen weiterentwickelt werden. Langfristig sollte die Etablierung geschlossener Kreisläufe für kritische Rohstoffe das Ziel sein.

- Nachdem bisher vor allem die Entwicklung von Einzeltechnologien gefördert wurde, geht es zunehmend um die reale und digitale Vernetzung der einzelnen Elemente des Energiesystems und die Systemintegration. Damit Deutschland sein technologisches Know-how im internationalen Wettbewerb gut ausspielen kann, muss die Forschungs- und Innovationspolitik die Entwicklung und Praxiserprobung der noch erforderlichen Methoden und Technologien befördern.

- Neben technologischen Innovationen erfordert die Erreichung der Klimaziele auch organisatorische, institutionelle und soziale Innovationen. Damit verbunden ist die Notwendigkeit, die Forschung auch in diesen Bereichen zu intensivieren. Die Energiewende wird speziell beim Ausbau der Windkraftanlagen durch Widerstände der Anwohner deutlich gebremst. Hier ist weitere Forschung im Bereich der Akzeptanz und Wissenschaftskommunikation erforderlich. Ebenfalls gilt es, ein besseres Verständnis des gesamten internationalen Energiesystems mit seinen ökologischen, ökonomischen, sozialpolitischen, industriepolitischen und geostrategischen Verflechtungen zu fördern.

Quellenverzeichnis

- (1) Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021): Ariadne-Kurzdossier – Reformationen für ein nachhaltiges Steuer- und Abgabensystem. https://ariadneprojekt.de/media/2021/05/Ariadne-Kurzdossier_Steuerreform_Juni2021.pdf (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (2) Bekk, A.; Held, A.; George, J. (2021): CO₂-basierte Refinanzierung der Erneuerbaren-Förderung – Welche Konsequenzen ergeben sich für Endverbraucher und Sektorkopplungstechnologien? In: ifo Schnelldienst 06/2021: Wie fair ist die Energiewende? Verteilungswirkungen in der deutschen Energie- und Klimapolitik. <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2021-06-energie-wende-verteilungswirkungen.pdf> (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (3) Deutsche Windguard, Windenergiestatistik: <https://www.windguard.de/windenergiestatistik.html> (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (4) Annahmen: Luft-Wärmepumpe mit 15 kW therm, Jahresarbeitszahl 3,1, 1.700 Volllaststunden, Nutzungsdauer 20 Jahre, Zinssatz 2%.
- (5) Greenpeace e.V. (2018): https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/2030_kohlefrei_fraunhofer_iee_greenpeace.pdf (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (6) Local Energy Consulting (2020): Akzeptanz und lokale Teilhabe in der Energiewende. Handlungsempfehlungen für eine umfassende Akzeptanzpolitik. Impuls im Auftrag von Agora Energiewende. https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_07_EE-Akzeptanz/182_A-EW_Akzeptanz-Energiewende_WEB.pdf (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (7) HIR Hamburg Institut Research gGmbH (2021): Ansätze zur Wärmeplanung in den Niederlanden und Übertragbarkeit auf Deutschland. Analyse im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität und Agora Energiewende. <https://www.agora-energie-wende.de/veroeffentlichungen/ansae-tze-zur-waermeplanung-in-den-niederlanden-und-uebertragbarkeit-auf-deutschland/> (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (8) Agora Energiewende und Universität Kassel (2020): Wie passen Mieterschutz und Klimaschutz unter einen Hut? https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_07_Warmmieten/A-EW_190_Mieterschutz_Klimaschutz_WEB.pdf (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (9) Becker Büttner Held (2020): Vereinbarkeit des „Referenztemperatur-Modells“ mit den Vorgaben der Energieeffizienzrichtlinie (EED). Analyse im Auftrag von Agora Energie-wende. https://static.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_07_Warmmieten/A-EW_191_Mieterschutz_Klimaschutz_WEB.pdf (Zugegriffen Juni 22, 2021)
- (10) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Für eine starke Stahlindustrie in Deutschland und Europa
- (11) Diese ist durch weitere Strategien zu ergänzen, wie dem Ausbau der Sekundärstahlproduktion im Sinne einer umfassenden Circular Economy und auch dem effizienten Einsatz von Energie und Materialien entlang der Wertschöpfungsketten.
- (12) Laut World Steel Statistical Yearbook betrug der Anteil des DRI-Verfahrens an der weltweiten Primärstahlerzeugung im Jahr 2019 in etwa 10% (111 Mt von 1.4Gt). In Deutschland wird eine Anlage in Hamburg betrieben.
- (13) Die notwendigen Investitionen sind in den meisten Fällen vernachlässigbar, außer bei sehr niedriger Auslastung der Anlagen.
- (14) Siehe z.B. University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL) and Agora Energiewende. (2021). Tomorrow's markets today: Scaling up demand for climate neutral basic materials and products. CLG Europe
- (15) Vgl. Axsen et al. (2020): »Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO₂ mitigation in road transport.« Nature Climate Change 10.9 (2020): 809-818.

(16) Plötz, P.; Wachsmuth, J.; Gnann, T.; Neuner, F.; Speth, D.; Link, S.(2021): Net-zero-carbon transport in Europe until 2050–Targets, technologies and policies for a long-term EU strategy. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/EU_Transport_policybrief_long.pdf (Zugegriffen Juni 22, 2021)

(17) Plötz et al. (2019): »Designing car bans for sustainable transportation.« Nature Sustainability 2.7: 534-536.

(18) Axsen et al. (2019). »Crafting strong, integrated policy mixes for deep CO₂ mitigation in road transport.« Nature Climate Change 10.9 (2020): 809- sowie Creutzig et al. (2015): »Transport: A roadblock to climate change mitigation?« Science 350.6263 (2015): 911-912.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: BNetzA (2021); (MVV, 2021); (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI, Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015) Eigene Berechnungen (3).

Abbildung 2: Fraunhofer CINES, eigene Berechnungen.

Abbildung 3: Studie „Wege zu einem klimaneutralen Gebäudebestand 2050“

Abbildung 4: Fraunhofer ISI Industriedatenbank

Abbildung 5: Quelle: Plötz, P.; Wachsmuth, J.; Gnann, T.; Neuner, F.; Speth, D.; Link, S.(2021): Net-zero-carbon transport in Europe until 2050–Targets, technologies and policies for a long-term EU strategy. Karlsruhe: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/EU_Transport_policybrief_long.pdf

(1) iStock / momnoiBild, (2) unsplash / DanielRoe, (3) iStock / WangAnQi, (4) iStock / MicroStockHub, (5) iStock / CharliChesvick, (6) iStock / ChinaFace, (7) iStock / Cozyta, (8) iStock / YevTony

Impressum

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München**

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V.,
München 2021

Kontakt

CINES

Cluster of Excellence Integrierte Energiesysteme

Hansastraße 27 c
80686 München

cines@zv.fraunhofer.de