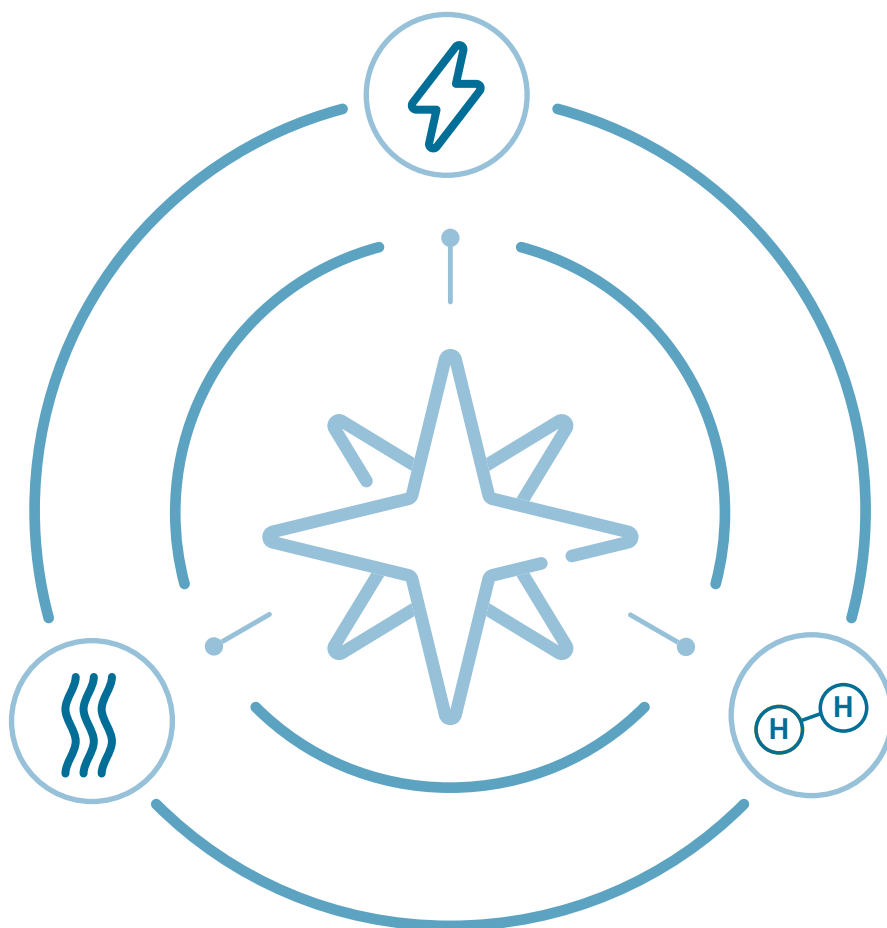




# Systementwicklungs- strategie 2024



## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)  
Öffentlichkeitsarbeit  
11019 Berlin  
[www.bmwk.de](http://www.bmwk.de)

### **Stand**

November 2024

Diese Publikation wird ausschließlich als Download angeboten.

Alle nicht gekennzeichneten Quellen sind im urheberrechtlichen Sinne dem BMWK zuzuordnen.

### **Gestaltung**

PRpetuum GmbH, 81541 München

### **Zentraler Bestellservice für Publikationen der Bundesregierung:**

E-Mail: [publikationen@bundesregierung.de](mailto:publikationen@bundesregierung.de)

Telefon: 030 182722721

Bestellfax: 030 18102722721

Diese Publikation wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Die Publikation wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

# Inhalt

Zusammenfassung.....	2
1. Strategischer Rahmen.....	7
2. Energienachfrage.....	13
2.1 Industrie.....	14
2.2 Gebäude.....	21
2.3 Verkehr.....	25
3 Energieangebot.....	28
3.1 Stromerzeugung.....	30
3.2 Wärmeerzeugung in Wärmenetzen.....	33
3.3 Wasserstoff und Wasserstoffderivate.....	34
3.4 Energieimporte und Energiehandel.....	37
3.5 Flexibilität und Speicher.....	39
4 Infrastrukturen.....	46
4.1 Stromnetze.....	47
4.2 Gasnetze.....	49
5. Ankerpunkte.....	53
6. Weiterer Analysebedarf.....	57
Anhang: Prozess der Systementwicklungsstrategie.....	59

# Zusammenfassung

## Energie muss sicher, sauber und bezahlbar sein.

Eine erfolgreiche Transformation des Energiesystems bedeutet nicht nur, Treibhausgasemissionen schnell und vollumfänglich zu senken. Dazu gehören auch ökonomisch und sozial nachhaltiges Handeln und Resilienz, um Krisen vorzubeugen. So haben der russische Angriffskrieg auf die Ukraine und die damit einhergehende Energiekrise die Verwundbarkeiten offengelegt, die mit einer fossilen und wenig diversifizierten Energieversorgung einhergehen. Der schnelle Ausbau der erneuerbaren Energien und eine höhere Energieeffizienz werden die Abhängigkeit von Energieimporten deutlich mindern. Gleichzeitig ist die Umstellung auf Erneuerbare entscheidend für eine emissionsfreie Energieerzeugung. Bei künftig notwendigen Energieimporten wird mehr Sorge für Diversifizierung und Resilienz getragen werden.

## Die Systementwicklungsstrategie soll eine sektorenübergreifend kohärente und robuste Transformation des Energiesystems gewährleisten.

Die Systementwicklungsstrategie (SES) ist im Energiewirtschaftsgesetz als gemeinsame Grundlage für die Netzentwicklungspläne Strom und Gas/Wasserstoff verankert. Sie wurde im Rahmen eines umfangreichen Beteiligungsprozesses und auf Grundlage wissenschaftlicher Analysen, insbesondere der BMWK-Langfristszenarien, erstmalig erarbeitet. Im Fokus der Strategie steht ein technisch-systemisches Leitbild für die Energiewende. Angesichts des langen Zeithorizonts der Analysen und der Komplexität des Energiesystems ist die SES als lerner- und regelmäßig wiederkehrender Prozess angelegt.

## Strom aus Wind und Photovoltaik ist die Grundlage des klimaneutralen Energiesystems.

Für die Stromerzeugung müssen Wind und Photovoltaik sehr schnell entsprechend den Ausbaupfaden des EEG weiter ausgebaut werden. Insbesondere Wasserstoffkraftwerke sichern das Stromsystem in Zeiten mit wenig Stromerzeugung aus Wind und Sonne ab. Für die Versorgung dieser Kraftwerke mit Wasserstoff ist neben dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur die Erschließung von Wasserstoffspeichern zentral. Insgesamt ist ein ausgewogener Erzeugungsmix aus Wind und PV anzustreben, um komplementäre Schwankungen bei Wind und Sonne für eine ausgeglichene Stromerzeugung zu nutzen.

## In den meisten Bereichen ist eine direkte Nutzung von Strom vorzuziehen.

Erneuerbar erzeugter Strom kann in den Nachfragesektoren in vielen Fällen direkt genutzt werden und so deren Dekarbonisierung ermöglichen. Eine solche direkte Nutzung von Strom, zum Beispiel mittels Wärmepumpen und Elektromobilität, ist häufig die effizienteste und kostengünstigste Lösung. Eine weitere Umwandlung wäre mit entsprechenden Energieverlusten verbunden. Durch eine direkte Stromnutzung wird demnach weniger Energie verbraucht und das System entlastet.

Es gibt jedoch Bereiche, in denen die direkte, synchrone Nutzung des erzeugten Stroms sehr aufwändig oder gar nicht möglich ist. In solchen Fällen kann Strom zunächst in Wasserstoff umgewandelt werden. Dieser wird gegebenenfalls noch zu Wasserstoffderivaten wie synthetischen Kohlenwasserstoffen weiterverarbeitet. Das ist zwar mit hohen Kosten und Umwandlungsverlusten verbunden, ist aber in manchen Bereichen unverzichtbar. Daher sollten Wasserstoff und seine Derivate möglichst nur zum Einsatz kommen, wenn eine direkte Nutzung von Strom nicht oder nur schwer machbar ist.

Hierzu zählen beispielsweise bestimmte Industrie- prozesse (z. B. in der Chemie- und Stahlindustrie) sowie der Luft- und Seeverkehr. Außerdem wird Wasserstoff langfristig zur Speicherung und Rück- verstromung von Energie benötigt werden.

### **Die Transformation der Industrie ist mit tiefgrei- fenden Umstellungen von Produktionsprozessen verbunden.**

Produktionsprozesse müssen insbesondere in der energieintensiven Industrie umgestellt werden: Während Prozesswärme überwiegend elektrifiziert werden kann, werden Wasserstoff und Wasserstoff- derivate insbesondere für die stoffliche Nutzung in der Chemie- und Stahlindustrie benötigt. Ander- weitig nicht oder nur schwer vermeidbare prozess- bedingte Emissionen, z. B. in der Kalk- und Zement- industrie, müssen abgeschieden und gespeichert werden. Zudem könnten diese Emissionen auch als Rohstoff genutzt werden, v. a. in der Chemieindus- trie. Welche Technologien sich in welchen Bereichen durchsetzen und wie die Wertschöpfungsketten etwa in der Chemie- und Stahlindustrie struktu- riert sein werden, ist aus heutiger Sicht offen. Die Planung der Infrastrukturen sollte der Industrie Handlungsspielräume bei den eingesetzten Tech- nologien und bei der Strukturierung der Wert- schöpfungsketten ermöglichen. Entscheidend für eine erfolgreiche Transformation ist die Verfügbar- keit der neuen Technologien und Energieträger innerhalb international wettbewerbsfähiger Rah- menbedingungen.

### **Energieeffizienz, Wärmepumpen und Wärme- netze ermöglichen einen klimaneutralen Gebäudesektor.**

Im Gebäudesektor sind Energieeffizienz, Wärme- pumpen und der Aus- und Umbau von Wärmenetzen die Kernelemente der Transformation. Hinzu kom- men in geringem Umfang Biomasse und perspekti-

visch möglicherweise Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe (synthetisches Methan). Wasserstoff und synthetische Energieträger werden im Gebäudesek- tor angesichts ihrer begrenzten Verfügbarkeit, hoher Kosten und Effizienznachteilen zumindest bis 2030 und voraussichtlich auch langfristig allenfalls eine begrenzte Rolle spielen. Der Anteil leitungsgebunde- ner Wärme wird deutlich ansteigen. Dazu sollten Wärmenetze verdichtet, ausgebaut und neu errichtet werden. Dies erfordert erhebliche Investitionen und bedeutet zusätzliche Kosten.

Die genaue Struktur der zukünftigen Wärmever- sorgung ergibt sich aus den lokalen Potenzialen erneuerbarer Wärme (beispielsweise Umgebungs- wärme, Geothermie oder Solarthermie) und unver- meidbarer Abwärme. Maßgebend sind weiterhin die Verfügbarkeit klimaneutraler Energieträger und der jeweiligen Infrastrukturen. Die lokalen Potenziale und geeigneten Wärmeversorgungs- strukturen werden im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung untersucht und in zukünftigen Ite- rationen der SES berücksichtigt.

### **Eine weitgehende Elektrifizierung des land- gebundenen Verkehrs und klimaneutrale Energieträger im Flug- und Schiffsverkehr ermöglichen die Transformation des Verkehrssektors.**

Im landgebundenen Verkehr sind direkt-elektrische Antriebe die effizienteste Option, um die Treibhaus- gasemissionen auf null zu senken. Verkehrsverlage- rung und Vermeidung können den Energiebedarf im Verkehrssektor weiter begrenzen. Pkw und die meisten Lkw fahren elektrisch, im Schwerlastver- kehr können auch weitere Energieträger, zum Bei- spiel Wasserstoff, zum Einsatz kommen. Syntheti- sche Flüssigkraftstoffe werden insbesondere im Luft- und Seeverkehr benötigt, da hier eine direkte Nutzung von Strom oft nicht möglich ist.

### **Wärme für Wärmenetze kann überwiegend von Wärmepumpen und erneuerbaren Wärmequellen bereitgestellt werden.**

Die Wärmeerzeugung in Wärmenetzen muss auf klimaneutrale Wärmequellen umgestellt werden. Großwärmepumpen können dabei verschiedene Wärmequellen erschließen, insbesondere Umgebungswärme und Abwärme. Sie werden daher eine entscheidende Rolle bei der Erzeugung klimaneutraler Wärme in Wärmenetzen spielen. Stromgeführte Wasserstoff-KWK, Geothermie, Solarthermie, Elektrokessel und Abfall-KWK ergänzen die Wärmeerzeugung in Wärmenetzen. Wärmespeicher ermöglichen eine effiziente Einbindung klimaneutraler Wärmequellen.

### **Der Hochlauf der Erzeugung von klimaneutral erzeugtem Wasserstoff und Wasserstoffderivaten im In- und Ausland muss schnell voranschreiten.**

Das Angebot von grünem Wasserstoff und Wasserstoffderivaten sollte schnellstmöglich ausgebaut werden. Bis zur ausreichenden Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff kann in der Übergangsphase blauer Wasserstoff zur Emissionsreduktion beitragen und die Transformation zu perspektivisch klimaneutralen Strukturen ermöglichen. Die inländische Erzeugung von grünem Wasserstoff sollte möglichst in der Nähe der erneuerbaren Stromerzeugungspotenziale erfolgen. So können in Zeiten eines hohen Stromangebots bei gleichzeitig geringer Nachfrage die Energie in Wasserstoff umgewandelt und zusätzliche Netzausbau bedarfe vermieden werden. Dadurch sinken die Kosten für das Gesamtsystem.

### **Der Europäische Energiehandel ist essenziell für eine sichere und kostengünstige Transformation.**

Energiehandel ermöglicht es, länderübergreifend die günstigsten Ressourcen zu nutzen, er trägt dazu bei, die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, und hilft, zeitliche Ungleichgewichte zwischen Erzeugung und Verbrauch effizient auszugleichen. Damit dieser Handel ermöglicht wird, müssen die Verbindungen des Stromnetzes zu den europäischen Nachbarländern weiter ausgebaut, eine europäische Wasserstoff-Infrastruktur geschaffen und diversifizierte Importrouten für weitere klimaneutrale Energieträger wie grünen Wasserstoff und Wasserstoffderivate aufgebaut werden.

### **Flexibilität wird zu einer zentralen Fähigkeit in einem von erneuerbaren Energien dominierten Energiesystem.**

Eine flexible Erzeugung, die auf Preissignale reagiert, sowie eine Nachfrage, die sich an die Stromerzeugung aus Wind und Sonne anpasst, sind essenziell für das zukünftige Stromsystem. Elektrolyseure, Wärmepumpen und Elektroautos bieten künftig sehr große, kurzfristige Flexibilitätspotenziale auf der Nachfrageseite, die gehoben werden müssen. Auf Erzeugungsseite sollten Anlagen steuerbar sein und auf Preissignale reagieren. Hinzu kommen umfangreiche Flexibilitätspotenziale von Batteriespeichern, die bereits heute in großer Zahl angeschlossen werden und Flexibilität sowie Systemdienstleistungen bereitstellen können. Wärmespeicher, die zum Beispiel in Verbindung mit Großwärmepumpen in Wärmenetzen oder auch in der Industrie eingesetzt werden, erleichtern die Integration der erneuerbaren Energien. Wasserstoffspeicher in Deutschland und Europa werden eine zentrale Rolle für den saisonalen Ausgleich von Angebot und Nachfrage und die Resilienz des Strom- und Wasserstoffsystems spielen. In Verbindung mit Wasserstoffkraftwerken tragen sie dazu bei, saisonale Gefälle bei der Strom-

erzeugung auszugleichen. Sie speichern Wasserstoff, der in Zeiten eines hohen Stromangebots bei gleichzeitig geringer Nachfrage mit Elektrolyseuren erzeugt wird.

### **Der schnelle und bedarfsgerechte Ausbau der Stromnetze auf allen Ebenen ermöglicht eine effiziente Transformation des Energiesystems.**

Sowohl die Stromübertragungsnetze als auch die Stromverteilnetze müssen zügig stark ausgebaut, erneuert und optimiert werden. Wesentliche Verzögerungen beim Ausbau der Stromnetze führen zu weniger effizienten und weniger robusten Transformationspfaden und erschweren es, die Klimaziele zu erreichen.

Das Stromübertragungsnetz ermöglicht den großräumigen Ausgleich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien innerhalb Deutschlands und in Europa. Der bestätigte Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045 beschreibt die nötigen Projekte für die Verstärkung, Optimierung und den Ausbau der Netze. Darüber hinaus sollten die Austauschkapazitäten mit den europäischen Nachbarländern weiter ausgebaut werden.

Die Stromverteilnetze müssen für den Anschluss von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen sowie neuer Stromverbraucher wie batterieelektrische Fahrzeuge und Wärmepumpen flächendeckend stark ausgebaut und technisch ertüchtigt werden.

### **Der Stromnetzbetrieb muss fortentwickelt werden.**

Im Zuge der Transformation des Energiesystems spielen betriebliche Aspekte eine immer größere Rolle. Die tiefgreifende Veränderung der Struktur des Stromsystems hin zu erneuerbaren Energien und neuen elektrischen Verbrauchern wie Elektro-

mobilität, Wärmepumpen und Elektrolyseanlagen muss betrieblich abgesichert sein, damit die Systemstabilität jederzeit gewahrt bleibt. Ziel ist ein sicherer und robuster Systembetrieb. Die Roadmap Systemstabilität der Bundesregierung hat hierfür konkrete Maßnahmen und Umsetzungsschritte festgelegt, die es gemeinsam mit der Branche konsequent umzusetzen gilt. Für die Transformation des Energiesystems müssen außerdem Marktprozesse und der Netzbetrieb besser aufeinander abgestimmt und in Einklang gebracht werden. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der Notwendigkeit einer deutlich beschleunigten Flexibilisierung des Stromsystems. Hierfür müssen Markt und Netz zusammengedacht werden.

### **Ein Wasserstoff-Kernnetz, das in großen Teilen aus dem heutigen Gasnetz entsteht, verbindet Angebot und Nachfrage und ermöglicht den europäischen Handel mit Wasserstoff.**

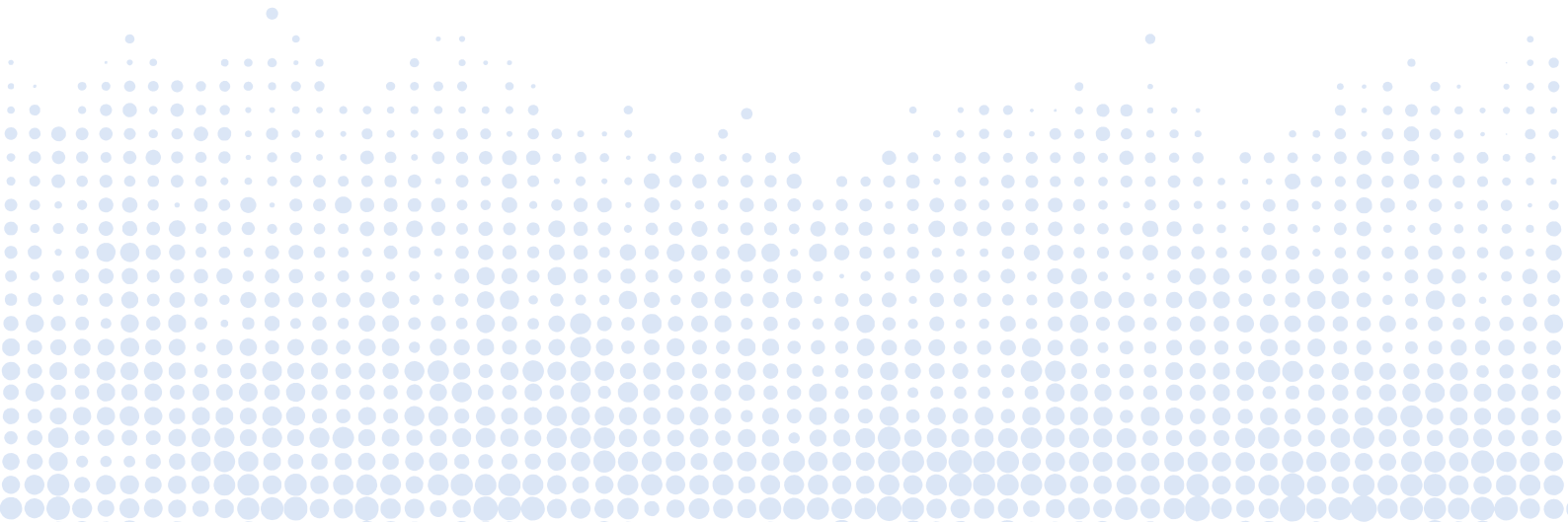
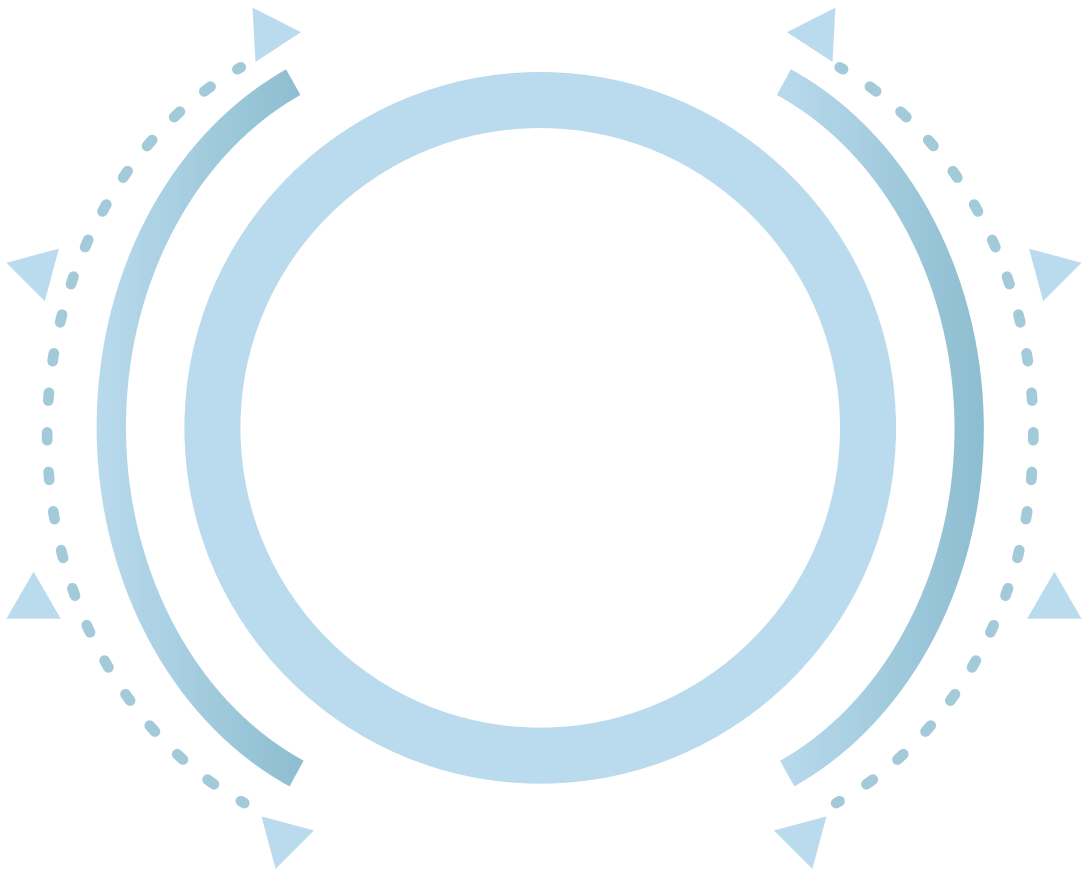
Für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur zentral. Angesichts der absehbar rückläufigen Erdgasnachfrage und vorhandener Parallelstrukturen kann ein großer Teil des Wasserstoffnetzes durch Umwidmung von Teilen des bestehenden Gasfernleitungsnetzes aufgebaut werden. Das zukünftige Wasserstofffernleitungsnetz verbindet die Wasserstoffspeicher und Erzeugungszentren im Norden Deutschlands sowie die Importrouten aus den europäischen Nachbarländern mit den Nachfragezentren, insbesondere den Standorten der Industrie und der zukünftigen Wasserstoffkraftwerke. Mit dem Wasserstoff-Kernnetz und der Weiterentwicklung im Rahmen der integrierten Netzentwicklungsplanung für Gas und Wasserstoff sind wichtige Grundlagen für einen szenario- und bedarfsorientierten Aufbau des zukünftigen Wasserstofffernleitungsnetzes gelegt.

### Die künftige Nutzung der Gasverteilnetze ist unsicher und bedarf der fortlaufenden Evaluierung.

Die rückläufige Nachfrage nach Erdgas macht viele Gasverteilnetze perspektivisch unwirtschaftlich. Wichtig sind daher rechtzeitige Planungen der Beteiligten vor Ort für einen geordneten Übergang. Einzelne Teile der Gasverteilnetze können beispielsweise zur Versorgung von Kraftwerken und industrieller Verbraucher auf einen Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet werden. Auch eine lokale Nutzung von Teilen der Gasverteilnetze für Biomethan ist möglich. Aufgrund dieses Wandels bedarf es eines neuen Ordnungsrahmens für die Regulierung und Finanzierung der Gasverteilnetze, die Verbrauchern und Kommunen eine verlässliche Übergangsplanung ermöglicht und die Versorgungssicherheit gewährleistet.



# 1. Strategischer Rahmen



## Energie muss sicher, sauber und bezahlbar sein.

Auf Grundlage des Energiewirtschaftsgesetzes verfolgt Energiepolitik gleichzeitig mehrere Ziele: Versorgungssicherheit, Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit. Eine erfolgreiche und ambitionierte Transformation des Energiesystems bedeutet also nicht nur, Treibhausgasemissionen schnell und vollumfänglich zu senken. Dazu gehören auch ökonomisch und sozial nachhaltiges Handeln und Resilienz, um Krisen vorzubeugen. Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine und die damit einhergehende Energiekrise haben schonungslos die ökonomischen und politischen Verwundbarkeiten und Abhängigkeiten offengelegt, die mit einer fossilen und wenig diversifizierten Energieversorgung einhergehen. Durch den schnellen Ausbau der erneuerbaren Energien und der dafür notwendigen Infrastrukturen sowie durch Steigerungen der Energieeffizienz und Senkung des Energieverbrauchs lassen sich die Treibhausgasemissionen deutlich mindern. Zugleich wird so die Abhängigkeit von fossilen Energieimporten und den damit verbundenen Versorgungs- und Preisrisiken weiter verringert, nachdem die Importe von Gas, Öl und Kohle aus Russland erfolgreich durch Importe aus anderen Herkunftsländern ersetzt worden sind. Bei künftig notwendigen Energieimporten wird mehr Sorge für Diversifizierung und Resilienz getragen werden.

## In den letzten Jahren wurden große Fortschritte erzielt.

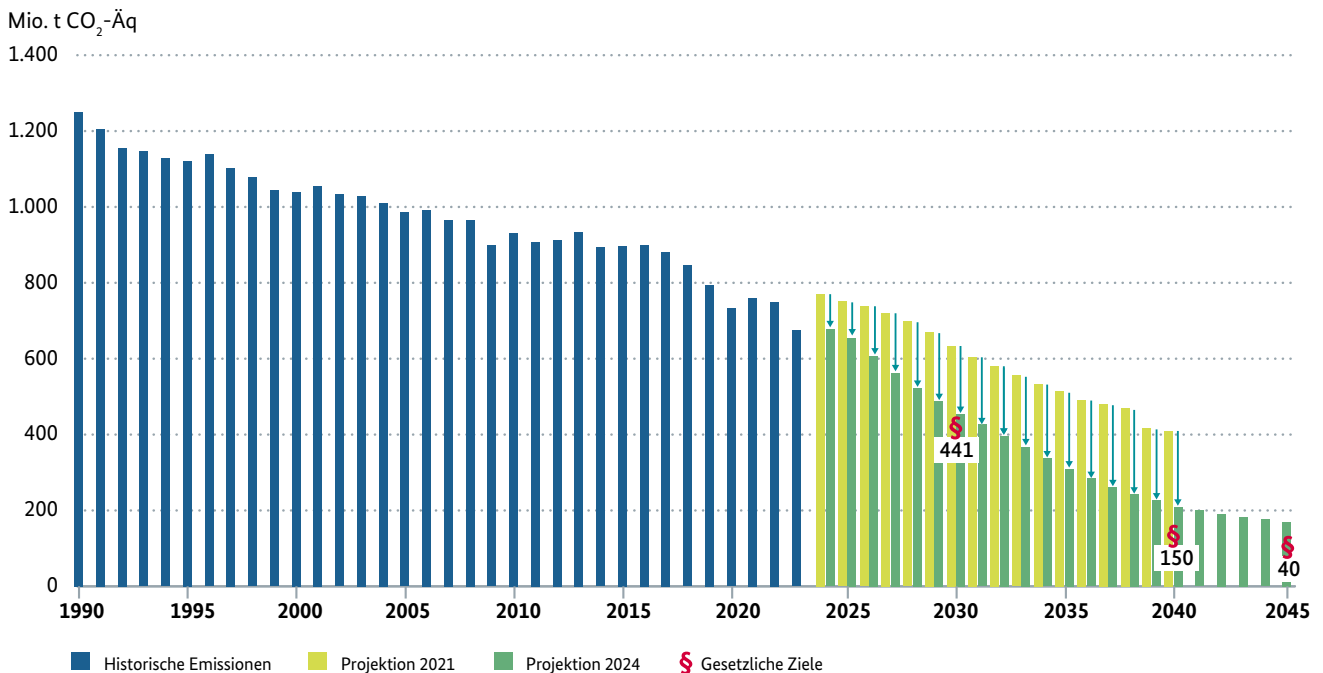
Die Bundesregierung hat in den vergangenen drei Jahren zentrale Weichen für eine sichere, saubere und bezahlbare Energieversorgung gestellt. Beispielsweise wurde mit dem Energiesofortmaßnahmenpaket die größte energiepolitische Novelle seit Jahrzehnten beschlossen. Hierfür wurden unter anderem das Erneuerbare-Energien-Gesetz, das Windenergie-auf-See-Gesetz sowie das Energie-

wirtschaftsgesetz ambitioniert reformiert und ein Windflächenbedarfsgesetz eingeführt. Das Instrumentarium des Energiesicherheitsgesetzes wurde zur Abwehr von Versorgungskrisen zeitgemäß erweitert. Weitere Fortschritte betreffen die Planungsbeschleunigung, die Wärmewende im Gebäudesektor, den Aufbau des Wasserstoff-Kernnetzes sowie die Einführung von Klimaschutzverträgen für die Dekarbonisierung der Industrie. Auch auf europäischer und internationaler Ebene hat sich die Bundesregierung erfolgreich für ambitionierte Reformen und Zielsetzungen eingesetzt. Darunter fallen etwa die Fortentwicklung des Europäischen Emissionshandels und das Bekenntnis der G7-Staaten zu dem Ziel einer überwiegend dekarbonisierten Stromversorgung bis 2035.

## Deutschland ist auf Kurs, aber noch zu langsam für Treibhausgasneutralität bis 2045.

Die Treibhausgas-Projektionen des Umweltbundesamtes zeigen: Deutschland ist zunehmend auf Kurs (siehe Abbildung 1). Aber trotz wichtiger Fortschritte in den vergangenen Jahren liegen noch viel Arbeit und große Herausforderungen vor uns. Zugleich bleibt nur wenig Zeit, um diese zu bewältigen. Schließlich soll Deutschland gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) bis 2045, bereits in gut 20 Jahren, netto-treibhausgasneutral sein. Zudem setzt das KSG ambitionierte Zwischenziele, um die Menge der gesamten Treibhausgasemissionen bis 2045 zu begrenzen. Bis 2030 müssen die Treibhausgasemissionen um mindestens 65 Prozent gegenüber 1990 gemindert werden und bis 2040 um mindestens 88 Prozent. Dafür ist ein tiefgreifender und schneller Umbau des gesamten Energiesystems erforderlich. Gerade mit Blick auf die notwendigen Infrastrukturen und den zeitlichen Vorlauf für deren Aus- und Umbau und den sicheren Systembetrieb muss die Transformation vom Ziel her gedacht und eine Vision eines treibhausgasneutralen Deutschlands im Jahr 2045 entwickelt

Abbildung 1: Brutto-Treibhausgasemissionen in Deutschland



Quelle: BMWK auf Basis von Daten des Umweltbundesamtes

werden. Auch in der EU muss Deutschland ambitionierte Klimaziele erreichen, unter anderem unter der EU-Klimaschutzverordnung. Hierfür sind weitere Anstrengungen notwendig.

### Frühzeitige und sektorenübergreifende Koordinierung reduziert Transformationskosten.

Die Investitionszyklen sind in vielen Bereichen lang (siehe Abbildung 2). Beispielsweise werden Gebäude, die heute saniert werden oder bei denen die Heizung ausgetauscht wird, in der Regel bis 2045 nicht noch einmal energetisch ertüchtigt. Ebenso weisen Anlageninvestitionen in der Industrie, in Kraftwerke und Netzinfrastrukturen vielfach lange Lebensdauern von deutlich über 20 Jahren auf. Insofern müssen neue Investitionen schon heute auf das Ziel Klimaneutralität ausgelegt sein. Zudem benötigen viele Investitionen einen zeitli-

chen Vorlauf für die Planung und Realisierung – auch wenn diese Zeiträume durch Maßnahmen zur Planungsbeschleunigung, beispielsweise für den Bau von Windenergieanlagen oder Stromnetzen, teilweise verkürzt werden könnten.

Gleichzeitig steigen im Zuge der Transformation die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen des Energiesystems und den Sektoren. Grund hierfür ist die zunehmende Nutzung von Strom und strombasierten Energieträgern in allen Sektoren. Entsprechend haben Entwicklungen in den unterschiedlichen Sektoren Auswirkungen auf die anderen Sektoren sowie auf die Anforderungen an das Energieangebot und die benötigten Infrastrukturen. Aufgrund der hohen Investitionsbedarfe, der langen Investitionszyklen und der relativ kurzen Zeitspanne bis 2045 ist eine sektorenübergreifende Koordinierung für eine bezahl-

bare und schnelle Transformation unverzichtbar. Politik, Wirtschaft und Gesellschaft kommen daher nicht umhin, bereits heute bestimmte Festlegungen zu treffen. Das gilt vor allem im Hinblick auf erforderliche Infrastrukturen.

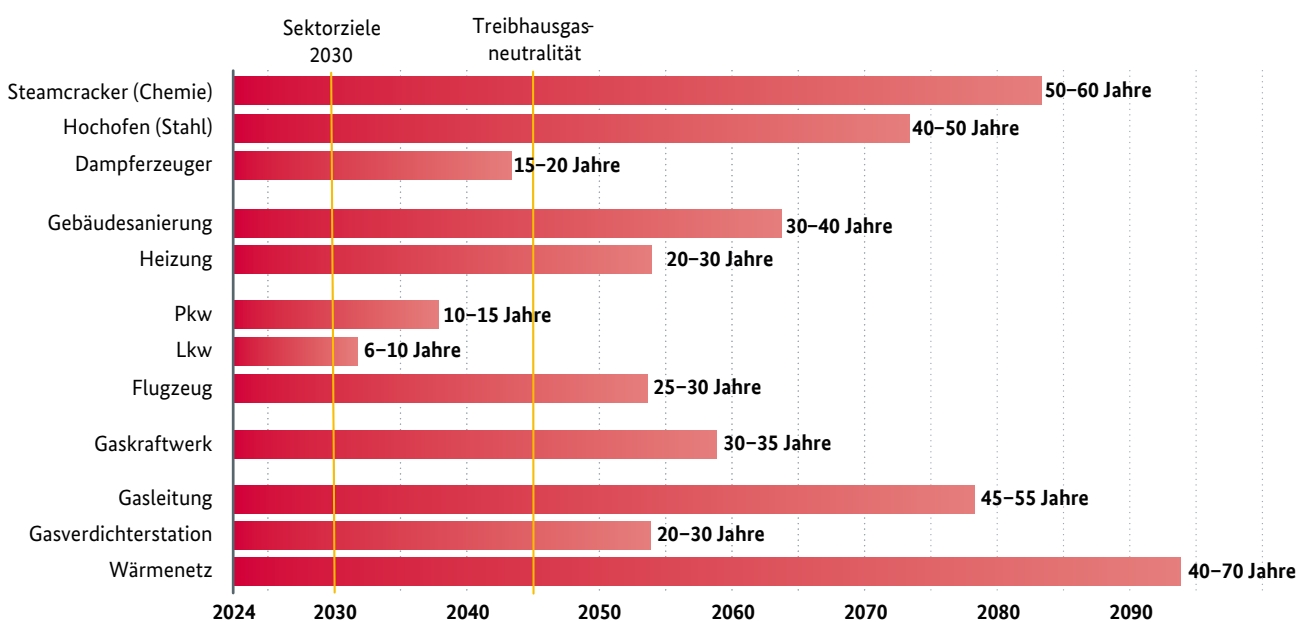
### Die Systementwicklungsstrategie soll sektorenübergreifende Kohärenz gewährleisten.

Gerade im Hinblick auf die Infrastrukturplanungen braucht die Transformation zu einem treibhausgasneutralen Energiesystem eine robuste, sektorübergreifende Strategie. Die Systementwicklungsstrategie (SES) soll diese Funktion erfüllen. Sie ist im Energiewirtschaftsgesetz als gemeinsame Grundlage für die Netzentwicklungspläne Strom und Gas/Wasserstoff verankert. Demnach haben die Szenariorahmen der Netzbetreiber die Festlegungen der SES angemessen zu berücksichtigen.

Hierfür wurde die vorliegende SES im Rahmen eines umfangreichen Beteiligungsprozesses und auf Grundlage wissenschaftlicher Analysen, insbesondere der BMWK-Langfristszenarien, erstmalig erarbeitet (siehe Anhang).

Nachfolgende Kapitel enthalten ein technisch-systemisches Leitbild für die Energiewende. Zudem werden Transformationspfade identifiziert, die mit dem Leitbild kompatibel und gegenüber Änderungen der Umweltbedingungen möglichst robust sind. Im Vordergrund der Strategie steht eine gesamtsystemische Betrachtung der Transformation. Instrumente zur Umsetzung wie zum Beispiel Investitionsanreize werden im Rahmen sektoren- und energieträgerspezifischer Strategien und Programme entwickelt.

Abbildung 2: Nutzungsdauern ausgewählter Technologien



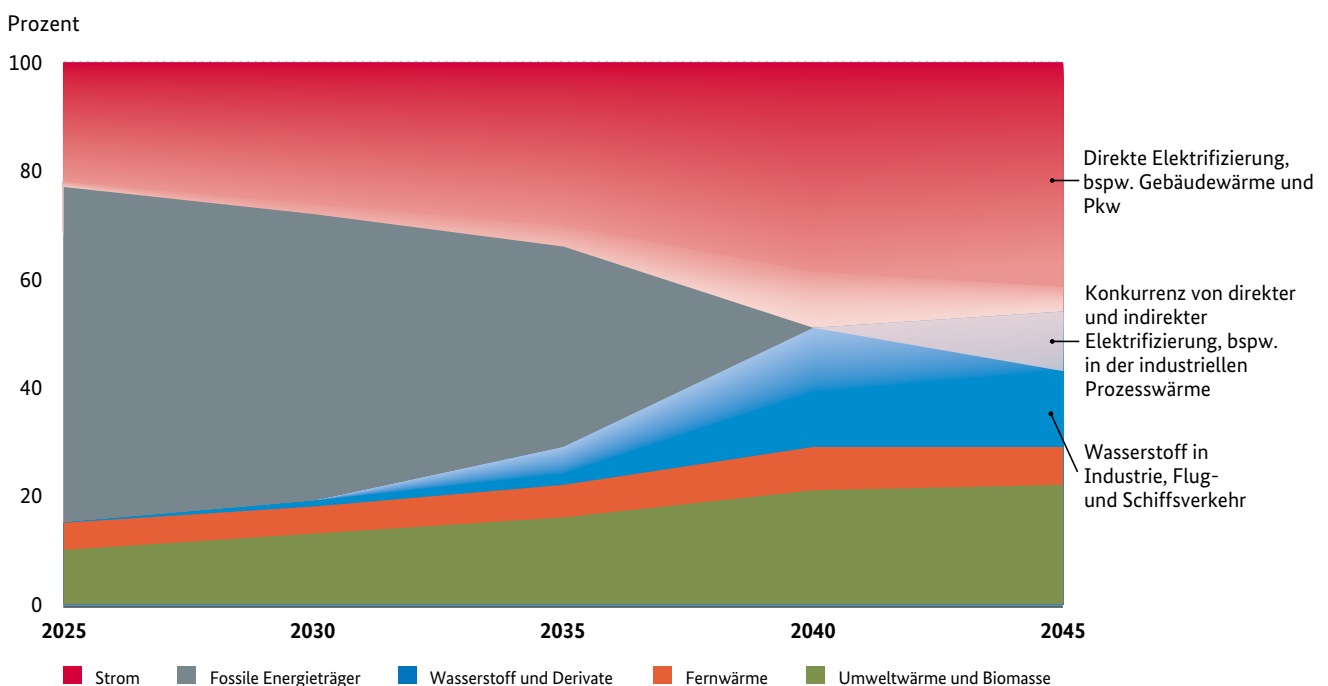
### Angesichts diverser Unsicherheiten soll die Infrastrukturplanung eine robuste Bandbreite an Transformationspfaden ermöglichen.

In den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr ist neben einer Steigerung der Energieeffizienz die zunehmende Nutzung von Strom im Rahmen der Sektorkopplung zentral. Wasserstoff und seine Derivate werden ebenfalls in großen Mengen in Bereichen benötigt, in denen die direkte Stromnutzung technisch nicht möglich oder nicht kostengünstig ist, beispielsweise in der Industrie. Dort und in anderen Bereichen des Energiesystems bestehen teilweise noch große Unsicherheiten über das richtige Verhältnis zwischen direktelektrischen und wasserstoffbasierten Lösungen (Abbildung 3). Dabei spielen auch Faktoren wie Kosten der Infra-

struktur eine Rolle. So ist etwa unklar, wie stark sich die Elektrifizierung in der industriellen Prozesswärme letzten Endes durchsetzt oder wie schnell der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft – auch im Ausland – gelingt.

Im Fall von Unsicherheit können eine Risikostreuung und das Aufrechterhalten von Handlungsoptionen einen Mehrwert bieten. Gleichzeitig erfordern lange Planungs- und Investitionszyklen, dass bereits heute bestimmte Richtungsentscheidungen getroffen werden, um die Marktentwicklung zu ermöglichen und Planungssicherheit zu bieten. Ein adaptiver Ansatz ist notwendig, in dessen Rahmen Richtungsentscheidungen getroffen sowie Planungen initiiert und überprüft werden. Aus diesem Grund ist die SES als lernender und regelmäßig

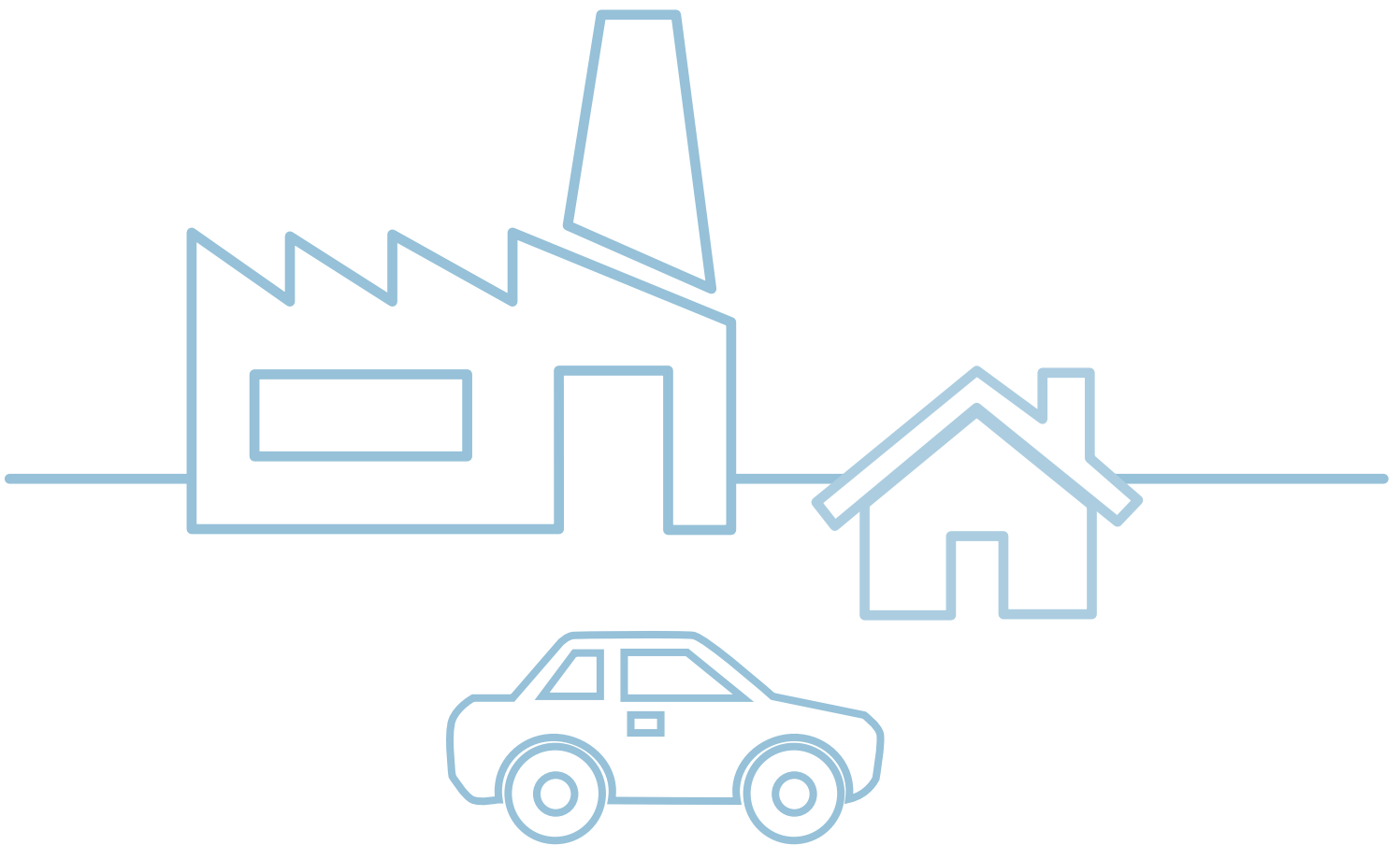
**Abbildung 3: Anteile am Endenergiebedarf in den Szenarien O45-Strom und O45-H2 der BMWK-Langfristszenarien.**



Quelle: Darstellungsweise adaptiert von Ueckerdt, F. et al. (2021) Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie.

wiederkehrender Prozess angelegt. Sie ist kein einmaliger ‚Masterplan‘, der alle Fragestellungen bis 2045 umfassend beantwortet. Vielmehr ist sie ein Prozess, in dessen Rahmen die nachfolgenden, technisch-systemischen Erkenntnisse regelmäßig überprüft und aktualisiert werden.

## 2. Energienachfrage



### Energieeffizienz entlastet das Energiesystem.

Ein zentrales Element robuster Transformationspfade ist die Steigerung der Energieeffizienz. Sie senkt kurz- und mittelfristig den Verbrauch fossiler Energieträger wie Erdgas und Mineralöl. Dies reduziert unmittelbar die Treibhausgasemissionen. Die Effizienzvorteile der Elektrifizierung senken zudem die Primärenergienachfrage. Weil beispielsweise Wärmepumpen und Elektroautos energieeffizienter sind, verbrauchen sie weniger Energie als Gasheizungen oder Verbrenner. Auch langfristig bleibt eine absolute Reduktion des Energieverbrauchs durch eine effizientere Nutzung eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Transformation. Wie die Vergangenheit zeigt, ist auch eine wachsende Wirtschaft mit einem absoluten Rückgang des Energieverbrauchs vereinbar. Energieeffizienz senkt den zukünftig ohnehin hohen Bedarf an erneuerbaren Energien. Ferner sinken mit höherer Energieeffizienz die Anforderungen an die Energieinfrastrukturen. Energieeffizienz begrenzt daher die Kosten und den Flächenbedarf für die Energiebereitstellung und die erforderlichen Infrastrukturen. Zugleich ist die Steigerung der Energieeffizienz mit Kosten verbunden, die bei der Entwicklung von Transformationspfaden berücksichtigt werden müssen.

## 2.1 Industrie

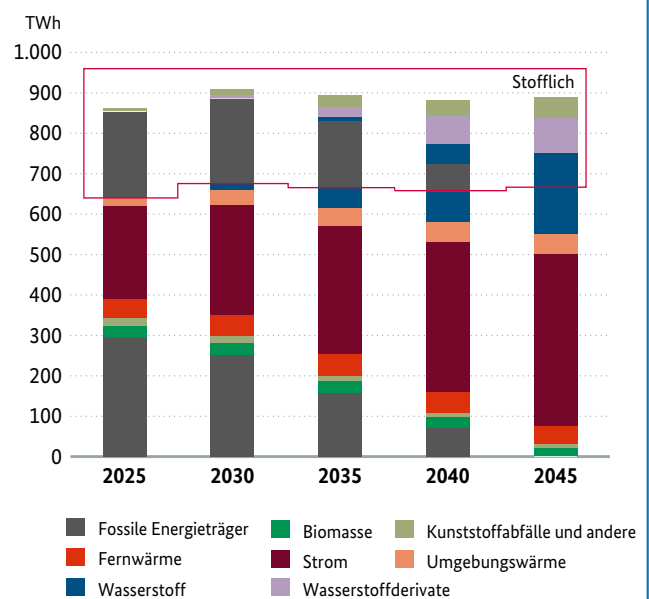
**Die Infrastrukturplanung soll den klimaneutralen Umbau der Industrie – einschließlich der energieintensiven Grundstoffindustrie – am Standort Deutschland sichern.**

Deutschland ist und bleibt ein bedeutender Industriestandort. Im Jahr 2023 erwirtschaftete das Verarbeitende Gewerbe rund 20 Prozent der gesamten Bruttowertschöpfung in Deutschland, was deutlich über dem EU-Durchschnitt liegt. Für diese Indust-

rieproduktion werden gegenwärtig überwiegend fossile Energieträger wie Erdgas, Kohle und Mineralölprodukte eingesetzt. Durch die Transformation wird sich dieser Energieträgermix grundlegend ändern (Abbildung 4). Der Energiebedarf der Industrie muss zunehmend klimaneutral gedeckt werden. Zugleich müssen der Industriestandort und die Arbeitsplätze erhalten werden. Die Infrastrukturplanung soll daher auf einen Energiebedarf ausgelegt werden, der den Erhalt der aktuell in Deutschland bestehenden Industriestruktur – insbesondere der Grundstoffindustrie – auch künftig sicherstellen kann.

Statt Kohle, Öl und Gas werden Strom und Wasserstoff zentral sein. Dabei wird Strom, zunehmend aus erneuerbaren Energien, zum wichtigsten Energieträger der Industrie. Die Elektrifizierung von Industrieprozessen ist vielfach der kostengüns-

**Abbildung 4: Endenergieverbrauch der Industrie (einschl. stoffliche Nutzung)**



Quelle: Szenario O45-Strom der BMWK-Langfristszenarien



tigste Pfad zur Klimaneutralität. Ferner benötigt die Industrie erhebliche Mengen an Wasserstoff und Wasserstoffderivaten, insbesondere für den stofflichen Einsatz und für anderweitig schwer zu dekarbonisierende Hochtemperaturprozesse. Darüber hinaus spielen auch Fernwärme und Biomasse eine Rolle, vor allem in Bereichen, die nicht anders zu dekarbonisieren sind. Biomasse wird jedoch zunehmend einen Beitrag zum Ersatz fossiler Rohstoffe in der Industrie leisten müssen. Es kommt also ein Mix von unterschiedlichen Technologien zum Einsatz.

### Die Transformation der Industrie erfordert tiefgreifende Veränderungen von Produktionsprozessen.

Um Klimaneutralität zu erreichen, genügt es nicht, fossile Energieträger durch erneuerbare Energien auszutauschen. In diversen Produktionsprozessen werden teilweise sehr hohe Temperaturen von 500 bis 2.000 °C benötigt, z. B. in der Stahl-, Chemie-, Glas- sowie Zement- und Kalkindustrie. Entsprechend sind Öfen oftmals unmittelbar in den Produktionsprozess integriert. Ferner wird der in fossilen Energieträgern enthaltene Kohlenstoff teilweise als Rohstoff genutzt, insbesondere in der Grundstoffchemie. Vor diesem Hintergrund müssen vielfach ganze Produktionsprozesse umgestellt werden, was mit erheblichen Investitionen in neue Anlagen verbunden ist.

Insbesondere die energieintensive Grundstoffindustrie steht vor einem umfassenden Umbau ihrer Anlagen. Beispielsweise muss in der Stahlindustrie die Herstellung von Primärstahl von der emissions- und energieintensiven Hochofenroute auf das Verfahren der Direktreduktion umgestellt werden. Bei diesem Verfahren soll zukünftig grüner Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt werden. Ebenso ist in der Chemieindustrie eine grundlegende Umstellung von Produktionsprozessen

erforderlich, um Klimaneutralität zu erreichen. Die neuen klimaneutralen Herstellungsverfahren sollten im Laufe dieser Dekade marktfähig werden, um unter Berücksichtigung der Investitionszyklen bis 2045 durch den Bestand diffundiert zu sein.

### Für die Transformation der Industrie sind große Mengen CO<sub>2</sub>-neutraler Sekundärenergieträger erforderlich, der Bedarf kann durch Effizienz und Kreislaufwirtschaft begrenzt werden.

Für die Treibhausgasneutralität der Industrie werden zukünftig große Mengen an erneuerbarem Strom und Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivaten benötigt. Ein möglichst schneller Hochlauf von erneuerbaren Energien und Wasserstoff erlaubt der Industrie, frühzeitig fossile Energieträger zu ersetzen und Emissionen zu senken. Zudem sind ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien sowie international wettbewerbsfähige Energiepreise von zentraler Bedeutung für die Industrietransformation und die Zukunft Deutschlands als Industriestandort.

Der hohe Bedarf an erneuerbaren Energien kann durch Steigerungen der Energie-, Material- und Ressourceneffizienz zumindest teilweise begrenzt werden. Beispielsweise kann durch eine materialeffizientere Bauwirtschaft die Nachfrage nach Stahl und Zement reduziert werden. Die Zementherstellung kann durch einen niedrigeren Klinkerfaktor und den Einsatz neuartiger Bindemittel effizienter werden.

Ebenso reduziert verstärkte Kreislaufwirtschaft nicht nur den (Primär-)Rohstoffbedarf, sondern ermöglicht den Aufbau bzw. Ausbau von Prozessrouten unter Nutzung von Sekundärrohstoffen. Beispielsweise könnte in der Stahlindustrie bis 2045 der Anteil der Sekundärstahlproduktion (derzeit rund 30 Prozent der dt. Stahlproduktion) auf Basis von Stahl(schrott), der wiederverwertet wird,

gesteigert werden, indem Elektro Stahl vermehrt auch für Qualitätsstähle genutzt wird. Dabei wird unter anderem das Thema Schrottverfügbarkeit und -qualität (Aufbereitung/ Trennung) eine Rolle spielen. Ferner könnte im Rahmen der Kreislaufwirtschaft Kunststoff verstärkt recycelt und damit der Rohstoff- und Energiebedarf der Chemieindustrie reduziert werden.

### Durch die Elektrifizierung von Industrieprozessen steigt der Strombedarf.

Auf die Prozesswärme entfällt derzeit mit knapp 450 TWh etwa die Hälfte des Energiebedarfs in der Industrie (unter Berücksichtigung des Energieträgerbedarfs für die stoffliche Nutzung). In den meisten Branchen spielt bislang Erdgas für die Bereitstellung von Prozesswärme eine zentrale Rolle. Erdgas ist insbesondere bei Dampf und Warmwasser, auf deren Erzeugung mit rund 200 TWh knapp die Hälfte des Energiebedarfs für Prozesswärme entfällt, der hauptsächlich genutzte Energieträger.

Die Elektrifizierung der Prozesswärme, insbesondere die Erzeugung von Dampf und Warmwasser mit Wärmepumpen und Elektrodenkesseln, kann fossile Energieträger in der Prozesswärmebereitstellung ersetzen. Durch die Elektrifizierung von Industrieprozessen steigt der Strombedarf des Industriesektors erheblich, so dass der direkte Stromverbrauch der Industrie von gut 200 TWh bis 2045 voraussichtlich auf etwa 300 bis 400 TWh ansteigt. Durch die Neuansiedelung weiterer Industrien, die z. B. Energiewendetechnologien wie Batterien herstellen, könnte der Strombedarf der Industrie noch weiter ansteigen. Daher ist es wichtig, im Rahmen der Elektrifizierung auch Flexibilitätspotenziale zu heben.

Neben Strom ist Fernwärme eine wichtige Option für die Bereitstellung von Dampf und Warmwasser für den Industriesektor. Dementsprechend kann

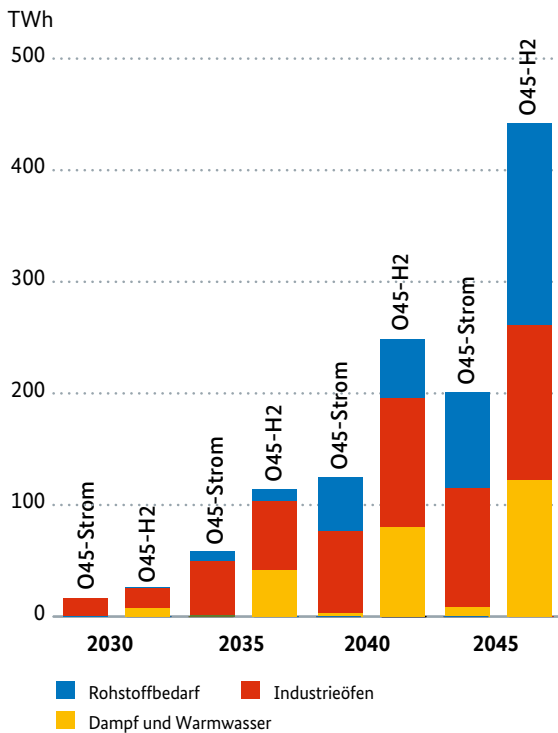
sich der Anteil der Fernwärme in der Prozesswärmebereitstellung der Industrie zukünftig weiter erhöhen.

### Große Mengen Wasserstoff werden insbesondere in der Chemie- und Stahlindustrie sowie teilweise bei Hochtemperaturprozessen genutzt.

Wasserstoff wird in der Industrie bereits bis 2030 in erheblichen Mengen benötigt. Zunächst wird Wasserstoff insbesondere für die Primärstahlherstellung benötigt. Bis 2030 wird voraussichtlich rund ein Drittel der deutschen Primärstahlproduktion auf das Direktreduktionsverfahren umgestellt. Hierfür entsteht voraussichtlich ein Bedarf von 20 bis 30 TWh Wasserstoff. Weitere neue Bedarfe, beispielsweise in der Chemieindustrie, können bereits bis 2030 hinzukommen. Ferner könnte der bereits vorhandene fossile Wasserstoffverbrauch, der aktuell in einer Größenordnung von rund 55 bis 60 TWh liegt und insbesondere in Raffinerien anfällt, zumindest teilweise durch CO<sub>2</sub>-neutralen Wasserstoff ersetzt werden. In Raffinerien stellt eine solche Substitution allerdings keine transformative Nutzung von Wasserstoff dar, weil hier primär die Herstellung von fossilen Energieträgern für den Verkehrssektor stattfindet.

Nach 2030 ist mit einer weiter stark steigenden Wasserstoffnachfrage zu rechnen (Abbildung 5). Unter der Annahme, dass bis 2045 die komplette heutige Primärstahlproduktion auf das DRI-Verfahren umgestellt wird, kann von einem Wasserstoffbedarf von bis zu 80 TWh ausgegangen werden. Bei einer Erhöhung des Anteils der Sekundärstahlproduktion an der gesamten Stahlproduktion sinkt der Wasserstoffbedarf. Dafür steigt insbesondere der Strombedarf. Wasserstoff wird aber auch dann noch für Hochtemperaturprozesse und für die Weiterverarbeitung benötigt.

**Abbildung 5: Neuer Wasserstoffbedarf im Industriesektor in den BMWK-Langfristszenarien**



Der langfristig größte Anteil der industriellen Wasserstoffnachfrage entfällt auf die chemische Industrie. Diese wird Wasserstoff in erheblichen Mengen als Rohstoff benötigen. Das genaue Volumen hängt von der zukünftigen Struktur der Wertschöpfungsketten ab, welche noch nicht absehbar ist. In der Chemieindustrie wird Wasserstoff insbesondere für die Produktion von sog. High Value Chemicals (HVC) und Ammoniak benötigt. Unter der Annahme eines Fortbestands der inländischen Ammoniakproduktion auf dem aktuellen Niveau von rund 2,5 Mio. t pro Jahr werden hierfür jährlich rund 15 TWh Wasserstoff benötigt. Sollte Ammoniak in Zukunft stärker importiert werden, sinkt der Bedarf an molekularem Wasserstoff in Deutschland entsprechend. Der mit Abstand größte Wasserstoffbedarf entfällt

zukünftig auf die Produktion von HVC, besonders für die Produktion von Olefinen und Aromaten für die Kunststoffherstellung. Die weitgehende Umstellung der Produktion von HVC auf die Methanol-to-olefins- bzw. Methanol-to-aromatics-Route führt zu einem stofflichen Wasserstoffbedarf von bis zu 150 TWh. Dieser Bedarf entstünde bei einem angenommenen Anteil dieser Verfahren von bis zu 80 Prozent an der Herstellung von HVC im Jahr 2045.

Darüber hinaus kann Wasserstoff in der Prozesswärme, insbesondere bei sehr hohen Temperaturniveaus, eingesetzt werden, da eine Elektrifizierung hier technisch und/oder wirtschaftlich oft nicht darstellbar ist (bis zu 140 TWh). Insgesamt benötigt der Industriesektor im Jahr 2045 zwischen 200 und 450 TWh Wasserstoff, je nach Entwicklung der industriellen Wertschöpfungsketten und der Prozesswärmebereitstellung.

**Biogene und synthetische Kohlenwasserstoffe decken ergänzend den Energiebedarf und werden zur stofflichen Nutzung benötigt.**

Neben Wasserstoff werden in der Industrie als weitere stoffliche Energieträger auch weiterhin Kohlenwasserstoffe und andere Derivate benötigt – allerdings in einem deutlich geringeren Umfang als heute und 2045 nicht mehr in fossiler Form.

Biomasse spielt weiterhin eine Rolle als Energieträger in der Industrie und sollte insbesondere auf jene Bereiche konzentriert werden, die schwer zu dekarbonisieren sind, um das begrenzte Gut effizient einzusetzen und einen wirksamen Beitrag zur Industrietransformation zu leisten. Beispielsweise können in der Industrie anfallende Abfallstoffe, z. B. in der Papierindustrie, vor Ort genutzt werden. Stoffliche Bedarfe können einer Kaskadennutzung zugeführt werden. Im Kontext der Abscheidung von schwer vermeidbaren Restemissionen besteht

zudem die Option zur Erzielung von langfristig notwendigen Negativemissionen. Insgesamt führt das beschränkte, nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial jedoch zu einer starken Nutzungskonkurrenz mit anderen Anwendungen, sodass die direkte Nutzung von Strom und der Einsatz von Wasserstoff bevorzugt werden sollten. An Bedeutung gewinnen wird Biomasse in der stofflichen Nutzung als nachhaltige Kohlenstoffquelle, insbesondere für die chemische Industrie. Neben Rezyklaten und abgeschiedenem CO<sub>2</sub> wird Biomasse so ein Baustein für die nachhaltige und klimaneutrale Umstellung der Rohstoffbasis der (chemischen) Industrie sein. Die Rahmenbedingungen für eine effiziente, Klimaschutz wirksame und nachhaltige Biomasseerzeugung und -nutzung sollen mit der Nationalen Biomassestrategie geschaffen werden.

Synthetische Kohlenwasserstoffe werden vor allem zur stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie benötigt, z. B. zur Herstellung von Schmiermitteln. Ferner kann ein Bedarf an synthetischen Kohlenwasserstoffen für die Kunststoffherstellung entstehen, indem anstelle der oder ergänzend zur Methanol-to-olefins- bzw. Methanol-to-aromatics-Route synthetisches Naphtha in elektrischen Steamcrackern eingesetzt wird. Bei einem Anteil des Verfahrens mit elektrischen Steamcrackern, die synthetisches Naphtha nutzen, von 20 bis 35 Prozent an dem für die Kunststoffherstellung produzierten Ethylen entsteht ein Bedarf an flüssigen synthetischen Kohlenwasserstoffen, der 2045 in einer Bandbreite von 40 bis 80 TWh pro Jahr liegen wird (inkl. des Bedarfs für weitere chemische Produkte wie Schmiermittel). Bei einem höheren Anteil von elektrischen Steamcrackern oder dem direkten Import von Methanol kann der Bedarf an synthetischen Kohlenwasserstoffen auch höher ausfallen. Das würde gleichzeitig einen entsprechend niedrigeren Bedarf an reinem Wasserstoff bedeuten. Ein geringerer Wasserstoffbedarf in der Industrie hat jedoch nur relativ geringe Auswir-

kungen auf die inländische Elektrolyseleistung, die benötigten Netzinfrastrukturen sowie die Wasserstoffspeicherbedarfe. Theoretisch können synthetische Kohlenwasserstoffe auch fossile Energieträger in der Prozesswärme ersetzen. Sie haben hier jedoch erhebliche Effizienz- und Kostennachteile gegenüber einer direkten Stromnutzung und gegenüber Wasserstoff.

**In der Industrie verbleiben schwer oder anderweitig nicht vermeidbare prozessbedingte Emissionen, die als Kohlenstoffquelle genutzt werden können oder gespeichert werden müssen.**

In der Industrie verbleibt ein Anteil prozessbedingter Emissionen, die aus heutiger Sicht nicht vermieden werden können, z. B. in der Zement- und Kalkindustrie. Diese Emissionen müssen abgeschieden und als Kohlenstoffquelle genutzt oder gespeichert werden.

Gleichzeitig besteht in der Industrie zukünftig ein CO<sub>2</sub>-Bedarf, vor allem für die Herstellung von Methanol, das als Grundstoff für die Kunststoffherstellung benötigt wird. CO<sub>2</sub> wird also zum Rohstoff für die chemische Industrie: Die Prozessemissionen der Zement- und Kalkindustrie und weitere schwer oder anderweitig nicht vermeidbare Emissionen, z. B. bei der Müllverbrennung, werden abgeschieden und als Rohstoff der Chemieindustrie zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 6). Unter der Annahme einer ähnlichen Industriestruktur wie heute bewegen sich diese Kohlenstoffquellen und der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Chemieindustrie 2045 in einer ähnlichen Größenordnung von rund 30 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Bei einer Veränderung der Wertschöpfungsketten in der Grundstoffchemie könnte sich dieser CO<sub>2</sub>-Bedarf reduzieren. Damit diese Nutzung von CO<sub>2</sub> gelingen kann, ist der Aufbau einer entsprechenden CO<sub>2</sub>-Infrastruktur erforderlich. Diese wird die CO<sub>2</sub>-Quellen mit den Chemiestandorten, die einen entsprechenden CO<sub>2</sub>-Bedarf haben,

oder mit etwaigen Speicherstandorten verbinden (Abschnitt 4.2). Um CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Nutzung von CO<sub>2</sub> zu vermeiden, muss entweder eine dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs in Produkten oder eine spätere Speicherung sichergestellt werden. Die Carbon-Management-Strategie der Bundesregierung schafft die Grundlage für die weitere Entwicklung der Kohlenstoffnutzung und -speicherung.

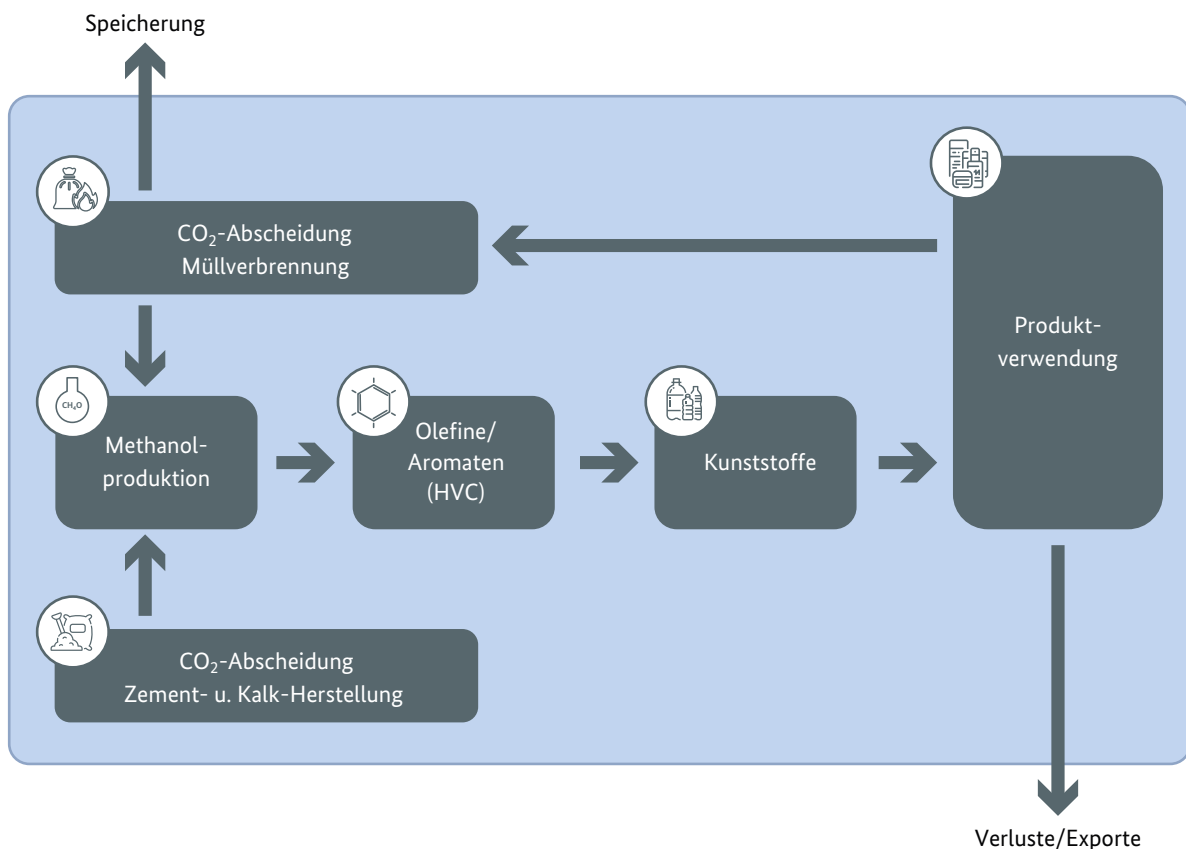
### Das Energiesystem muss flexibel auf die Transformation der Industrie reagieren können.

Die Struktur der energieintensiven Industrien ist regional teils durch sehr große Standorte geprägt,

an denen mehrere energieintensive Unternehmen angesiedelt sind. Hinsichtlich der genauen Entwicklung einzelner Standorte bestehen bei der Umstellung auf neue Produktionsverfahren Unsicherheiten darüber, wie die Wertschöpfungsketten und Industrieprozesse in Zukunft im Einzelnen strukturiert werden. Dies hat auch Rückwirkungen auf die Bedarfe an die verschiedenen Energieträger und die hierfür erforderlichen Infrastrukturen.

Vor diesem Hintergrund muss das Energiesystem flexibel auf die Transformation der Industrie reagieren können. Hierfür ist insbesondere im Hinblick auf Energieträger- und diesbezügliche Importbedarfe sowie die Infrastrukturanforderungen eine

**Abbildung 6: Schematische Darstellung des industriellen CO<sub>2</sub>-Kreislaufs in den BMWK-Langfristszenarien**



systemische Koordinierung erforderlich. Die Planung der Wasserstoff- bzw. Strominfrastrukturen sollte die Versorgung der Industriestandorte mit klimaneutralen Energieträgern sicherstellen, um die Transformation der Standorte zu ermöglichen.

Für die betroffenen Unternehmen steht dabei insbesondere die langfristige Planungs- und Investitionssicherheit im Mittelpunkt.

### Instrumente zur Transformation der Industrie

Das BMWK hat eine **Industriestrategie** vorgelegt, in der unter anderem die Transformation zur Treibhausgasneutralität bis 2045 beschrieben wird. Wichtige diesbezügliche Maßnahmen konnten bereits auf den Weg gebracht werden bzw. befinden sich in Vorbereitung:

Mit der jüngsten **Reform des Europäischen Emissionshandels** wurde das zentrale Instrument für die Dekarbonisierung der Industrie gestärkt. Der Emissionshandel setzt marktwirtschaftliche Anreize für Emissionsminderungen und deckt mit rund 80 Prozent den größten Teil der Emissionen des Industriesektors ab. Der neue **CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichsmechanismus** (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) wird CO<sub>2</sub>-Emissionen, die bei der Herstellung von bestimmten in die EU importierten Produkten angefallen sind, bepreisen und so zu einem fairen Wettbewerbsumfeld für die europäische Industrie beitragen.

Auf nationaler Ebene fördern wir mit **Klimaschutzverträgen** moderne, klimafreundliche Produktionsverfahren in den energieintensiven Industriebranchen. Dafür gleichen Klimaschutzverträge dort, wo klimafreundliche Produktionsverfahren gegenwärtig noch nicht konkurrenzfähig betrieben werden können, die Mehrkosten im Vergleich zu konventionellen Verfahren aus. Mit der **Bundesförderung Industrie und Klimaschutz** fördern wir mit bis zu 200 Mio. Euro je Unternehmen Investitionen in klimafreundlichen Produktionsanlagen. Mit der **Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft** unterstützen wir neben Energie- und Ressourceneffizienz auch Investitionen in die Prozesswärme und in Transformationspläne. Die **Dekarbonisierung der Industrie und den Wasserstoffhochlauf** fördern wir zudem im Rahmen der IPCEI (Important Projects of Common European Interest). Impulse für die Nachfrage nach grünen Produkten setzen wir u. a. über die öffentliche Beschaffung mit dem Konzept Grüne Leitmärkte.

Zudem haben wir durch eine **Kreislaufwirtschaftsstrategie** die Grundlage für weitere Instrumente zur Steigerung der Ressourceneffizienz gelegt. Und schließlich werden wir in einer Carbon-Management-Strategie festlegen, wie mit schwer oder anderweitig nicht vermeidbaren Emissionen künftig umgegangen werden soll. Ein Großteil davon fällt in der Industrie an und könnte dort stofflich genutzt werden.



## 2.2 Gebäude

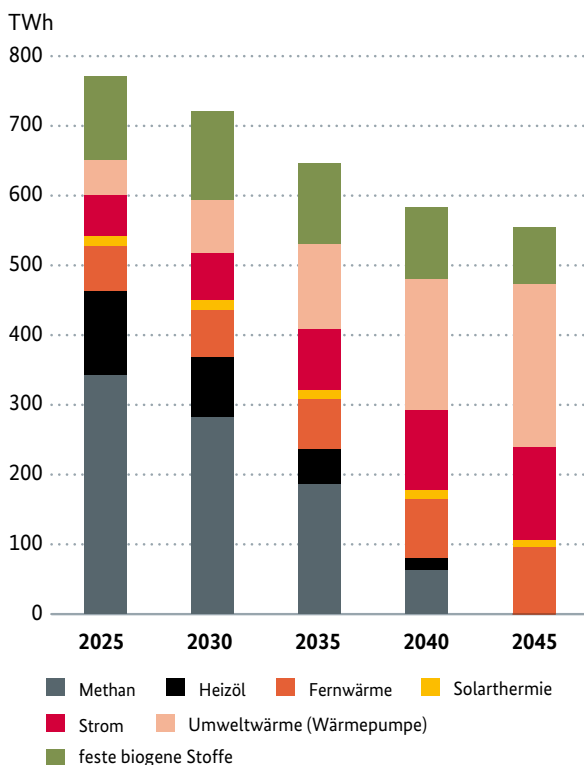
**Die Kernelemente für die Klimaneutralität im Gebäudesektor sind eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz, der Einbau von Wärmepumpen sowie der umfassende Aus- und Umbau von Wärmenetzen.**

Aktuell sind rund die Hälfte der Heizungen in Deutschland Gasheizungen und etwa ein Viertel Ölheizungen. Dementsprechend machen die fossilen Energieträger Erdgas und Heizöl mit gemeinsam über 500 TWh den Großteil des Endenergieverbrauchs im Gebäudesektor aus. Um die Klimaziele im Gebäudesektor auf dem gesamtsystemisch kostengünstigsten Weg zu erreichen, sind im Kern drei

Hebel zu bewegen: erhebliche Steigerung der Energieeffizienz, massiver Hochlauf von Wärmepumpen, Aus- und Umbau der Wärmenetze. Vor allem durch die Sanierung von Bestandsgebäuden kann der Endenergieverbrauch deutlich reduziert werden. Umweltwärme, Strom und Fernwärme werden zu den Säulen der zukünftigen Wärmeversorgung im Gebäudesektor (siehe Abbildung 7). Gleichzeitig sinken mit höherer Energieeffizienz die Anforderungen an die Energieinfrastrukturen. Energieeffizienz begrenzt daher die Kosten und den Flächenbedarf für die Energiebereitstellung und die erforderlichen Infrastrukturen.

**Die Energieeffizienz im Gebäudebereich muss insbesondere durch eine beschleunigte energetische Sanierung erhöht werden.**

**Abbildung 7: Endenergieverbrauch des Gebäudesektors (ohne Geräte)**



Quelle: Szenario O45-Strom der BMWK-Langfristszenarien

Um die Energienachfrage für Gebäudewärme spürbar zu reduzieren, ist neben energieeffizienten Neubauten vor allem die energetische Sanierung bestehender Gebäude von zentraler Bedeutung. Hier können technologische Innovationen und Verfahren wie serielle Sanierung zur Beschleunigung und Effizienzsteigerung beitragen. Dadurch kann der jährliche Endenergieverbrauch für Heizung und Warmwasser von aktuell über 700 TWh bis 2045 auf etwa 550 TWh reduziert werden – trotz des zusätzlichen Stromverbrauchs durch dezentrale Wärmepumpen. Ein erheblicher Teil dieses Endenergiebedarfs entfällt auf die Umweltwärme, die von Wärmepumpen genutzt wird (z. B. Außenluft, Grundwasser, Erdreich). Ohne Berücksichtigung dieser Umweltwärme kann der verbleibende Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser damit auf weniger als 350 TWh pro Jahr reduziert – gegenüber heute also halbiert – werden. Wärmepumpen tragen also wesentlich zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor bei, wobei sie in sanierten Gebäuden höhere Wirkungsgrade und somit einen niedrigeren Stromverbrauch erzielen.

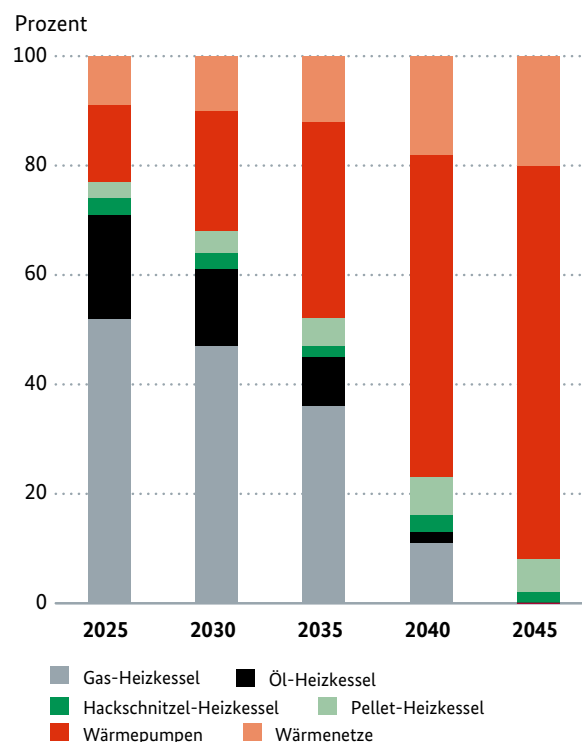
Die verbesserte Energieeffizienz mindert kurz- und mittelfristig den Bedarf an fossilen Energieträgern wie Erdgas und Heizöl. Langfristig senkt sie zudem den Bedarf an erneuerbaren Energien für den Gebäudesektor. Insofern begrenzt Energieeffizienz nicht nur die individuellen Heizkosten, sondern auch volkswirtschaftlich die Energieträgerkosten. Zudem sind sanierte Gebäude mit höherem Wohnkomfort und höherer Resilienz verbunden; das gilt auch in Bezug auf den in Zeiten der Klimaerwärmung immer wichtigeren sommerlichen Wärmeschutz. Gleichzeitig erfordert die Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor umfangreiche Investitionen.

### Der Hochlauf von Wärmepumpen ist zentral für die Wärmewende.

Derzeit wird etwa jede zweite Heizung in Deutschland mit Gas und jede vierte Heizung mit Öl betrieben. Um die Klimaziele zu erreichen und zugleich die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren, ist eine sukzessive Ablösung dieser Heiztechnologien erforderlich (Abbildung 8). Dabei sind Wärmepumpen in allen einschlägigen Energieszenarien, die Klimaneutralität erreichen, zentral für die zukünftige Wärmeversorgung von Gebäuden und werden durch weitere Technologien ergänzt.

Im Jahr 2030 sollen rund 6 Millionen Wärmepumpen eingebaut sein. Dafür müssen ab 2025 weit über 500.000 Wärmepumpen pro Jahr installiert werden. Bis 2045 werden in den Langfristszenarien bis zu 18 Mio. Wärmepumpen für eine klimaneutrale Wärmeversorgung benötigt. Selbst wenn Wasserstoff im Gebäudebereich nach 2030 in größeren Mengen zum Einsatz kommen sollte, wären rund 13 Mio. Wärmepumpen bis 2045 nötig. Insofern ist der massive Hochlauf von Wärmepumpen in jedem Fall erforderlich.

**Abbildung 8: Anteile der Heizungs-technologien**



Quelle: Szenario O45-Strom der BMWK-Langfristszenarien

### Wärmenetze versorgen Gebäude in urbanen Regionen.

Wärmenetze bilden neben den dezentralen Wärmepumpen das zweite Standbein der zukünftigen Wärmeversorgung. Wärmenetze sind insbesondere in Gebieten mit dichter Bebauung wirtschaftlich, so dass sie vor allem in Städten eine wichtige Rolle bei der Wärmeversorgung übernehmen. Da dort teilweise Restriktionen beim Einsatz von Wärmepumpen bestehen, ergänzen sich dezentrale Wärmepumpen und Wärmenetze als tragende Säulen der zukünftigen Wärmeversorgung sehr gut. Zudem können Wärmenetze als Aggregator für regenerative Quellen und Technologien wie Umgebungswärme, industrielle Abwärme, Geothermie und



Solarthermie fungieren und so umfassend Potenziale zur CO<sub>2</sub>-Minderung erschließen.

Die Anzahl der Wärmenetzanschlüsse sollte von heute rund 1,7 Mio. bis 2045 auf 4 bis 5 Mio. gesteigert werden. Hier ist zu beachten, dass die Anschlüsse vorwiegend an größeren Gebäuden erfolgen und mit einem Anschluss in der Regel mehrere Wohnungen versorgt werden. Für diese Verdreifachung sind durchschnittlich über 100.000 Neuanschlüsse pro Jahr nötig.

**Zumindest bis 2030 spielen Wasserstoff und synthetische Energieträger (z. B. synthetisches Methan) angesichts ihrer begrenzten Verfügbarkeit und hoher Kosten im Gebäudesektor nur eine geringe Rolle.**

Bis 2030 werden Wasserstoff und synthetische Energieträger nur in begrenzten Mengen bzw. nur zu relativ hohen Preisen verfügbar sein und können deshalb im Gebäudesektor kaum zur Emissionsreduktion beitragen. Vor diesem Hintergrund ist die Nutzung von Wasserstoff und synthetischen Energieträgern kurz- und mittelfristig keine Alternative zum Hochlauf von Wärmepumpen und zum Ausbau der Wärmenetze. Auch nach 2030 ist ein umfangreicher und großflächiger Einsatz in der dezentralen Wärmeversorgung aus heutiger Sicht äußerst unwahrscheinlich.

Die Erzeugung von synthetischen Kohlenwasserstoffen wie erneuerbares Methan ist mit hohen Umwandlungsverlusten verbunden. Zudem benötigen synthetische Kohlenwasserstoffe eine Kohlenstoffquelle, wofür im größeren Maßstab als CO<sub>2</sub>-neutrale Quelle letztlich nur die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft verbleibt (Direct Air Capture). Dementsprechend bleiben synthetische Kohlenwasserstoffe voraussichtlich sehr teure Energieträger.

Bei Wasserstoff sind die Umwandlungsverluste bei dessen Herstellung zwar geringer als bei synthetischen Kohlenwasserstoffen. Gleichwohl wird für die Bereitstellung einer Kilowattstunde Wärme durch eine Wasserstoffheizung im Vergleich zu Wärmepumpen immer noch ein Vielfaches an Strom benötigt. Dementsprechend sind die Energiekosten bei der Nutzung von Wasserstoffheizungen deutlich höher als bei Wärmepumpen. Trotz der höheren Investitionskosten werden daher Privathaushalte, wo immer möglich, auf Wärmepumpen wechseln. Zudem müssten angesichts des deutlich größeren Strombedarfs zusätzliche Stromerzeugungspotenziale zur Herstellung des Wasserstoffs im In- und/oder Ausland erschlossen werden. Darüber hinaus können bei Wasserstoff im Gegensatz zu erneuerbarem Methan nicht die vorhandenen Gasheizungen genutzt werden, da diese nicht mit reinem Wasserstoff betrieben werden können. In den entsprechenden Netzgebieten wäre deshalb ein synchroner flächendeckender Einbau von Heizungen, die mit 100% Wasserstoff betrieben werden können, erforderlich. Darüber hinaus bräuchte es neben Anpassungen bei weiteren Gasverbrauchern eine Umstellung der Gasnetze auf Wasserstoff.

Vor diesem Hintergrund ist der dezentrale Einsatz von Wasserstoff als großflächige Lösung im Gebäudesektor aus heutiger Sicht unwahrscheinlich. Wasserstoff könnte langfristig unter Umständen in bestimmten Konstellationen in Gebäuden eingesetzt werden. Eine zentrale Voraussetzung wäre zunächst ein hohes Angebot des Energieträgers Wasserstoff. Auch unter Berücksichtigung des Wasserstoffbedarfs in anderen Sektoren müsste er relativ günstig verfügbar sein. Zudem wäre für einen dezentralen Einsatz von Wasserstoff der Anschluss an ein Wasserstoffnetz nötig. Dies ist insbesondere denkbar, wenn lokal eine industrielle Wasserstoffnachfrage besteht.

### Bei der Nutzung von Biomasse besteht eine starke Nutzungskonkurrenz zu anderen Sektoren.

Das beschränkte, nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial führt zu einer starken Nutzungskonkurrenz

mit anderen Anwendungen, beispielsweise im Industriesektor. Die absehbare Knappheit der wertvollen Ressource Biomasse dürfte sich zukünftig zunehmend in den Preisen für Biomasse niederschlagen. Aus gesamtsystemischer Sicht sollte Biomasse dementsprechend vor allem in Gebäuden

### Instrumente zur Transformation des Gebäudesektors

Zentrale Maßnahmen im Gebäudesektor konnten bereits in diesem und im vergangenen Jahr auf den Weg gebracht werden:

Ein zentrales Instrument für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors ist die zweite Novelle des **Gebäudeenergiegesetzes**. Diese trat zum 1. Januar 2024 in Kraft. Danach müssen zukünftig neue Heizungen grundsätzlich mit mindestens 65 Prozent erneuerbaren Energien betrieben werden. Bei der **Bundesförderung effiziente Gebäude** haben wir einen stärkeren Fokus auf die energetische Gebäudesanierung gesetzt. So verbessern wir die Energieeffizienz im Gebäudesektor. Ein Förderbonus für die energetisch schlechtesten Gebäude verstärkt den Sanierungsanreiz und adressiert die größten Treibhausgasminderungspotenziale. Das Gebäudeenergiegesetz flankieren wir zudem mit einer sehr auskömmlichen Förderung in Form direkter Zuschüsse zu den Investitionskosten für den Heizungsaustausch. Zudem haben wir den Neubaustandard im Gebäudeenergiegesetz bzgl. der Anforderungen an den Primärenergieverbrauch neuer Gebäude auf das Niveau des Effizienzhausstandards 55 angehoben.

Die Wärmewende muss letztlich vor Ort unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten umgesetzt werden. Daher haben wir mit dem **Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz)** die kommunale Wärmeplanung als zentrales Koordinierungsinstrument der Wärmewende flächendeckend eingeführt. Den Aus- und Umbau der Wärmenetze unterstützen wir finanziell mit der **Bundesförderung für effiziente Wärmenetze**. Das Programm fördert den Neubau, den Ausbau und die Umstellung von Wärmenetzen auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme. Anschlüsse an ein Wärmenetz sind über die BEG förderfähig. Zudem hat das Bundeskabinett den Entwurf zum Gesetz zur **Beschleunigung der Genehmigungsverfahren für Geothermieranlagen, Wärmepumpen und Wärmespeicher** verabschiedet. Ziel des Entwurfs ist, genehmigungsrechtliche Hemmnisse bei der Erschließung der Geothermie sowie dem Ausbau von Wärmepumpen und Wärmespeichern abzubauen.

Mit dem neuen **Energieeffizienz-Gesetz** haben wir erstmals einen sektorübergreifenden Rahmen fürs Energiesparen geschaffen. Das Gesetz legt Energieeffizienzziele für Primär- und Endenergie für das Jahr 2030 fest. Darüber hinaus wird ein Endenergieverbrauchsziel für 2045 angepeilt, damit Bund, Länder, Kommunen und Unternehmen zeitig planen und in energiesparende Maßnahmen investieren können.

eingesetzt werden, in denen keine Wärmepumpe genutzt werden kann und die nicht an ein Wärmenetz angeschlossen werden können (z.B. denkmalgeschützte Gebäude im ländlichen Raum). In diesen Fällen kann feste Biomasse wie Hackschnitzel und Pellets zum Einsatz kommen.

### Energieeffizienz begrenzt den Energiebedarf im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) und bei Geräten.

Im Bereich GHD und Geräte werden die meisten Anwendungen bereits heute elektrisch betrieben, z.B. Beleuchtung, Aufzüge, Waschmaschinen, Gefrier- und Kühlgeräte. Die übrigen Anwendungen können entweder auf Strom umgestellt werden, z.B. Gasherde. Andere können mit erneuerbaren Energien wie Biomasse und Solarthermie betrieben werden, z.B. Prozesswärme und mechanische Energie in Krankenhäusern, in der Landwirtschaft oder im Baugewerbe.

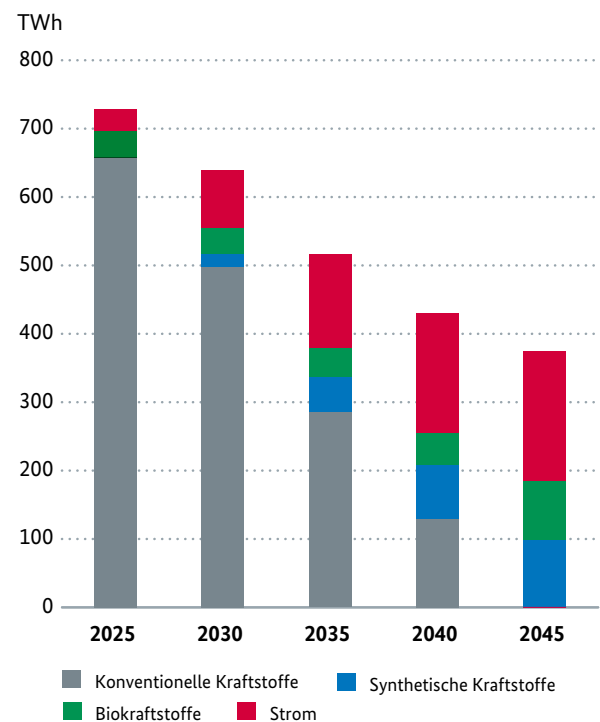
Bis 2045 kommen auch neue Energieverbraucher hinzu, z.B. Rechenzentren und Klimaanlage. Energieeffizienz ist zentral, um den Energiebedarf der vorhandenen und neuen Energieverbraucher zu begrenzen.

## 2.3 Verkehr

**Im Straßenverkehr werden fossile Kraftstoffe weitgehend durch Strom und im Luft- und Seeverkehr insbesondere durch synthetische Kraftstoffe ersetzt.**

Derzeit werden im Verkehrssektor jährlich über 700 TWh fossile Kraftstoffe genutzt, vor allem in Form von Diesel, Benzin und Kerosin. Angesichts des hohen Anteils fossiler Energieträger ist eine sehr hohe Transformationsgeschwindigkeit nötig, um Klimaneutralität 2045 zu erreichen.

**Abbildung 9: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors**



Quelle: Szenario O45-Strom der BMWK-Langfristszenarien

Über 95 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen des Verkehrs entfallen auf den Straßenverkehr, davon knapp zwei Drittel auf den Pkw-Verkehr und ein gutes Drittel auf Nutzfahrzeuge. Deshalb ist eine grundlegende Umstellung des Pkw- und Lkw-Verkehrs erforderlich. Im Straßenverkehr wird zukünftig Strom der dominierende Energieträger sein (Abbildung 9). Zudem benötigt der Verkehrssektor in erheblichem Umfang biogene bzw. synthetische Kraftstoffe, die vor allem im Luft- und Seeverkehr zum Einsatz kommen.

### Die weitgehende Elektrifizierung des landgebundenen Verkehrs sowie Verkehrsverlagerung und -vermeidung reduzieren den Energieverbrauch.

Selbst bei nur moderaten Änderungen des Mobilitätsverhaltens wird insbesondere durch den Wechsel auf Elektromobilität der jährliche Endenergiebedarf des Verkehrssektors zukünftig stark gemindert. Verantwortlich hierfür sind die deutlich geringeren Umwandlungsverluste von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Gleichzeitig wächst durch den Umstieg auf Elektromobilität die Bedeutung von Strom, was sich in einem entsprechenden Anstieg des Stromverbrauchs niederschlägt. Daher sollte Elektromobilität möglichst flexibel durch entsprechendes Lademanagement ins System integriert werden.

Darüber hinaus können Verkehrsverlagerung und -vermeidung den Energieverbrauch des Verkehrssektors weiter reduzieren. Dadurch werden kurz- und mittelfristig CO<sub>2</sub>-Emissionen und langfristig der Bedarf an erneuerbaren Energien gemindert. Zur Verkehrsvermeidung tragen beispielsweise vermehrtes Home-Office und der Verzicht auf Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings bei. Gleiches gilt für eine integrierte Stadt- und Verkehrsplanung zugunsten kurzer Wege. Die Verlagerung von Personen- und Güterverkehr von der Straße auf die Schiene und das Binnenschiff setzt entsprechend attraktive Angebote voraus.

### Pkw und die meisten Lkw fahren künftig mit Strom, insbesondere im Schwerlastverkehr können auch weitere Energieträger zum Einsatz kommen.

Bis 2030 sollen mindestens 15 Mio. Pkw batterieelektrisch fahren. Bis 2045 besteht fast die gesamte Pkw-Flotte aus batterieelektrischen Pkw. Ebenso können leichte und mittelschwere Lkw aufgrund

ihrer Fahrprofile effizient batterieelektrisch betrieben werden, sodass sich diese Technologie auch hier durchsetzt.

Im Schwerlastverkehr werden elektrische Antriebe ebenfalls eine zentrale Rolle spielen. In bestimmten Fällen werden in Lkw zudem alternative Antriebstechnologien bzw. Energieträger wie Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe zum Einsatz kommen.

Für die Umstellung des Straßenverkehrs auf Elektromobilität ist der Aufbau eines flächendeckenden Netzes für die Ladeinfrastruktur zentral. Für die Nutzung von Wasserstoff im Schwerlastverkehr ist zudem der Aufbau einer entsprechenden Tankstelleninfrastruktur notwendig.

### Der Luft- und Seeverkehr benötigt klimaneutrale Flüssigkraftstoffe.

Im Luft- und Seeverkehr stoßen batterieelektrische Lösungen und Brennstoffzellen an ihre Grenzen und sind hier nur in wenigen Fällen anwendbar (z. B. Regionalflugzeuge). Gerade auf langen Strecken, z. B. Interkontinentalflügen, und bei hohen Transportgewichten werden aufgrund ihrer hohen Energiedichte auf absehbare Zeit weiterhin Kohlenwasserstoffe benötigt. Zudem zeichnen sich Flugzeuge und Schiffe durch lange Nutzungsdauern von 25 bis 50 Jahren aus. Dementsprechend werden viele der aktuell bzw. absehbar genutzten Flugzeuge und Schiffe in 2045 noch betrieben werden und klimaneutrale Kraftstoffe benötigen.

Aus heutiger Sicht erscheint hierfür in 2045 ein Bedarf an synthetischen bzw. biogenen Flüssigkraftstoffen in der Größenordnung von rd. 150 bis 200 TWh plausibel. Die letztliche Höhe hängt wesentlich von der Entwicklung des Luftverkehrs und weiteren Faktoren wie z. B. dem Tankverhalten des internationalen Verkehrs ab.

### Busse und Bahnen nutzen zukünftig weitgehend Strom und ergänzend Wasserstoff.

Damit auch der Bahnverkehr klimaneutral wird, sollten weitere Bahnstrecken elektrifiziert werden. Nicht elektrifizierte Bahnstrecken sollten 2045

entweder mit Batterie- oder Wasserstoff-Zügen betrieben werden. Busse können ebenfalls größtenteils elektrisch betrieben werden oder bei speziellen Anwendungsprofilen Wasserstoff nutzen.

### Instrumente zur Transformation des Verkehrssektors

Im Verkehrssektor sind unter anderem folgende Instrumente relevant:

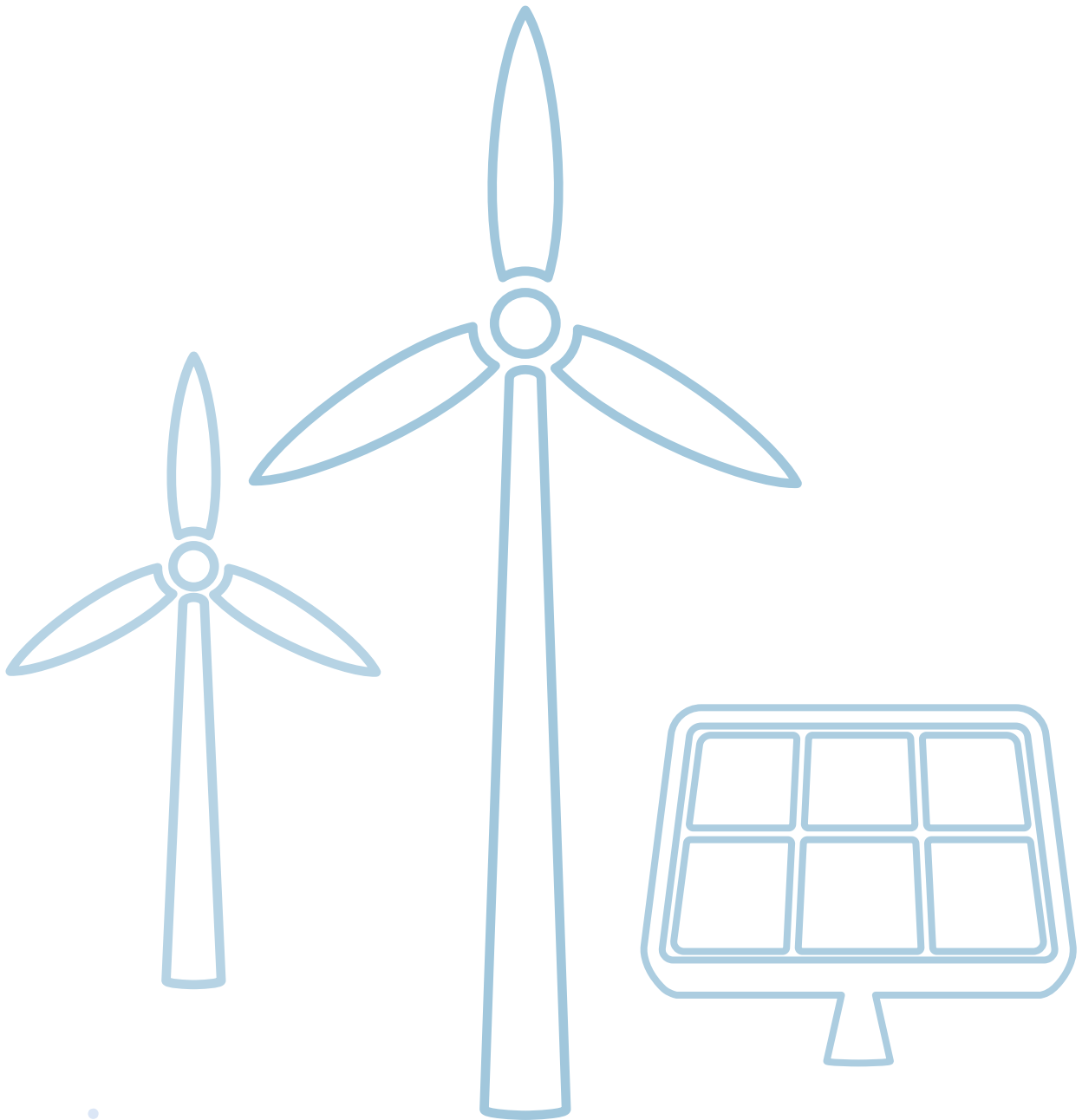
Durch die Bereitstellung erheblicher Finanzmittel sollen die **Modernisierung des Schienennetzes** und der **Ausbau der Kapazitäten im Personen- und Güterverkehr** vorangetrieben werden. Die Kapazitäten des Bestandsnetzes sollen unter anderem durch die Digitalisierung gesteigert werden. Durch Ausbaumaßnahmen und **Verbesserungen der Angebotsqualität** soll die Attraktivität des Öffentlichen Personennahverkehrs und des Radverkehrs erhöht werden. Zudem wurde das **Deutschland-Ticket** eingeführt.

Die Finanzierung der Investitionen in die Schiene soll wesentlich auch über einen **CO<sub>2</sub>-Aufschlag auf die Lkw-Maut** in Höhe von 200 Euro pro Tonne CO<sub>2</sub> gedeckt werden, der zum 1. Dezember 2023 eingeführt wurde. Zugleich werden emissionsfreie Lkw bis Ende 2025 von der Infrastrukturgebühr befreit. Anschließend zahlen emissionsfreie Lkw ab 4,25 Tonnen lediglich 25 Prozent des regulären Mautsatzes. Ferner wurde die **Lkw-Mautpflichtgrenze** ab 1. Juli 2024 auf Nutzfahrzeuge ab 3,5 Tonnen abgesenkt.

Mit dem **Masterplan Ladeinfrastruktur** und weiteren Maßnahmen zum Ausbau der Ladeinfrastruktur wird sichergestellt, dass die notwendige Infrastruktur für die Elektrifizierung der Fahrzeugflotten vorhanden ist. Für den Schwerlastgüterverkehr wird zudem der **Aufbau von Infrastruktur-Grundnetzen für batterieelektrische und Wasserstoff-Lkw** bis 2025 sichergestellt.

Die **Einführung und Nutzung synthetischer Kraftstoffe** soll durch diverse Maßnahmen, z. B. Abbau von rechtlichen und administrativen Hemmnissen sowie Forschungsförderung, vorangetrieben werden.

### 3. Energieangebot





### Die Transformation der Nachfragesektoren stellt hohe Anforderungen an das Energieangebot zur Bereitstellung CO<sub>2</sub>-neutraler Energieträger (Strom, Wasserstoff und Wasserstoffderivate).

In den Nachfragesektoren Industrie, Gebäude und Verkehr werden zunehmend Strom und strombasierte Energieträger wie Wasserstoff und synthetische Kohlenwasserstoffe genutzt (Sektorenkopplung). Durch den Hochlauf der Elektromobilität und von Wärmepumpen sowie die Nutzung von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten können fossile Energieträger wie Erdgas und Mineralöl in den Nachfragesektoren ersetzt werden. Dadurch steigt die Nachfrage nach Strom, Wasserstoff und dessen Derivaten bis 2045 stark an:

**Strom:** Alleine der Stromverbrauch der Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr erreicht in 2045 eine Größenordnung von 800 bis 900 TWh. Hinzu kommt der Stromverbrauch des Umwandlungssektors, der ebenfalls steigen wird. Denn künftig sind erhebliche Strommengen für die Herstellung von grünem Wasserstoff mittels Elektrolyse erforderlich, in geringerem Umfang auch für den Betrieb von Großwärmepumpen, die für die Wärmeerzeugung in Wärmenetzen eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung von weiteren Komponenten des Stromverbrauchs wie Netz- und Speicherverluste erreicht der Bruttostromverbrauch in Deutschland in 2045 voraussichtlich eine Größenordnung von rund 1.100 bis 1.300 TWh. Zum Vergleich: Aktuell liegt der Bruttostromverbrauch in Deutschland bei rund 520 TWh pro Jahr. Der Stromverbrauch in Deutschland wird sich also in 20 Jahren mehr als verdoppeln.

**Wasserstoff:** Die größten Wasserstoffmengen werden zukünftig in der Industrie benötigt, besonders in der Chemie- und Stahlindustrie und teilweise auch bei Hochtemperaturprozessen. Je nach Entwicklung der Industriestruktur benötigt allein der

Industriesektor in 2045 rund 200 bis 400 TWh Wasserstoff pro Jahr. Hinzu kommen Wasserstoffbedarfe aus dem Verkehrs- und Umwandlungssektor. Im Verkehrssektor könnte im Schwerlastverkehr eine relevante Wasserstoffnachfrage entstehen, die voraussichtlich jedoch deutlich unter 40 TWh liegen wird. Im Umwandlungssektor wird Wasserstoff in Wasserstoffkraftwerken für die Rückverstromung und in begrenztem Umfang für die Wärmeerzeugung in Wärmenetzen benötigt. Insgesamt erscheint aus heutiger Sicht in 2045 eine Wasserstoffnachfrage von 360 bis 500 TWh plausibel.

**Wasserstoffderivate:** Bis 2045 entsteht eine erhebliche Nachfrage von rund 200 TWh an synthetischen Kohlenwasserstoffen. Im Verkehrssektor werden synthetische Flüssigkraftstoffe für den Luft- und Seeverkehr benötigt. In der Industrie sind Wasserstoffderivate insbesondere zur stofflichen Nutzung in der Chemieindustrie erforderlich. Es bestehen allerdings in Bezug auf zukünftige Produktionsmengen, Strukturierung von Prozessen und Lieferketten noch Unsicherheiten. Daher kann der Bedarf an Wasserstoffderivaten, etwa in Form von Ammoniak oder Methanol, auch höher ausfallen und teilweise den oben genannten Bedarf an reinem Wasserstoff reduzieren.

### Die Erschließung ausreichender erneuerbarer Stromerzeugungspotenziale im In- und Ausland ist zentral für das Gelingen der Energiewende.

Strom wird zum zentralen Energieträger. Zum einen steigt der Strombedarf unmittelbar durch die umfangreiche Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren. Zum anderen wird Strom für die Produktion von grünem Wasserstoff und dessen Derivaten benötigt. Für die Versorgung der Nachfragesektoren mit Strom und strombasierten Energieträgern wie Wasserstoff und dessen Derivate ist daher die Erschließung ausreichender Stromerzeugungspotenziale essenziell.

Angesichts des hohen Bedarfs ist neben einem massiven Ausbau der inländischen Stromerzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien der Import von Strom und strombasierten Energieträgern erforderlich. Durch direkte Elektrifizierung und Energieeffizienz wird der Bedarf an Stromerzeugungskapazitäten im In- und Ausland und damit auch der Flächenbedarf auf hohem Niveau begrenzt.

### 3.1 Stromerzeugung

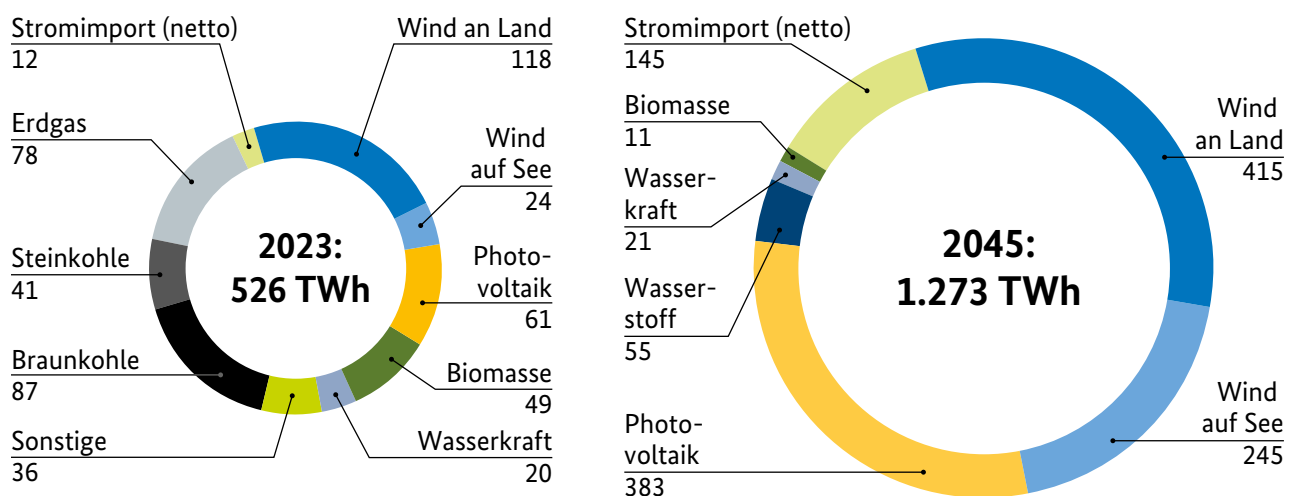
**Wind und PV sind die Säulen des zukünftigen Stromsystems und müssen sehr schnell entsprechend den gesetzlichen Zielen ausgebaut werden.**

Strom aus Windenergie und Photovoltaik deckt zukünftig mit Abstand den Großteil der Stromnachfrage (Abbildung 10). Hierfür müssen sie mit sehr hohem Tempo ausgebaut werden und dabei zukünftig auch mehr Systemverantwortung über-

nehmen und Systemdienstleistungen erbringen. Nach der Roadmap Systemstabilität der Bundesregierung sollen z. B. netzbildende Stromrichter bis 2030 einen signifikanten Beitrag zur Systemstabilität leisten. Zudem müssen neue Wind- oder Photovoltaikanlagen konsequent steuerbar sein, sowohl marktseitig als auch für die Netzbetreiber. Wetterabhängige Angebotsspitzen schaffen die Möglichkeit für sehr preisgünstige Stromverbräuche und Speicherung, aber nicht immer findet jede angebotene Megawattstunde eine Nachfrage. Dann muss auch die Erzeugung aus Windenergie und Photovoltaik reagieren.

Hinzu kommt weitere Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wie Biomasse und Wasserkraft. Die Stromerzeugung aus steuerbaren Kraftwerken beruht zukünftig größtenteils auf Wasserstoff. Ferner wird Deutschland auch erneuerbaren Strom aus Regionen mit großen und kostengünstigen Stromerzeugungspotenzialen importieren, z. B. aus dem Nordseeraum (siehe Abschnitt 3.4).

**Abbildung 10: Bruttostromverbrauchsmix in Deutschland**



Quelle: AG Energiebilanzen (links) und BMWK-Langfristszenarien (O45-Strom, rechts)



Um den hohen Strombedarf zu decken, sehen die im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG) verankerten Ausbaupfade folgende Zielmarken für den Ausbau der Windenergie und Photovoltaik vor:

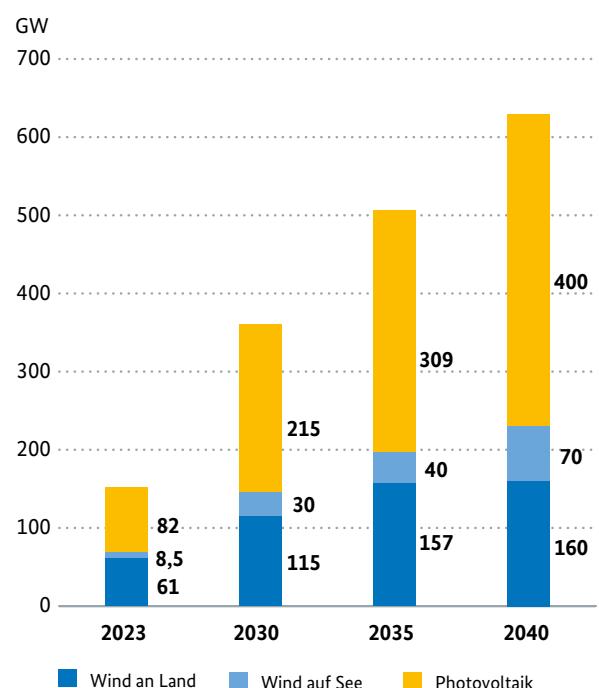
- Bis 2030 soll die installierte Leistung bei Wind an Land von aktuell rund 62 GW auf 115 GW steigen, bei Wind auf See von aktuell rund 9 GW auf 30 GW und bei Photovoltaik von aktuell rund 90 GW auf 215 GW.
- Bis 2040 soll die installierte Leistung bei Wind an Land auf 160 GW und bei Photovoltaik auf 400 GW steigen. Unter Berücksichtigung des vorgesehenen Ausbaupfades für Wind auf See wird das für 2045 vorgesehene Ausbauziel von 70 GW voraussichtlich bereits im Jahr 2040 erreicht (Abbildung 11). Mit diesen Kapazitäten können 2040 rund 1.000 TWh Strom aus Wind und Photovoltaik erzeugt werden.
- Der weitere Ausbau nach 2040 hängt unter anderem davon ab, wie sich die letztlich zu deckende Stromnachfrage genau entwickelt und welche Stromerzeugungskapazitäten im Nord- und Ostseeverbund sowie in den Nachbarstaaten installiert werden. Ferner bleibt abzuwarten, welche weiteren Potenziale bei den erneuerbaren Energien noch erschlossen werden können.

Diese Ausbauziele erfordern eine massive Beschleunigung der Ausbaugeschwindigkeit bei den erneuerbaren Energien. Hierfür soll der jährliche Zubau bei Wind an Land sukzessive erhöht werden und in der zweiten Hälfte der Dekade rund 10 GW pro Jahr erreichen. Zum Vergleich: In 2023 wurden 3,6 GW neu installiert, nachdem in 2022 2,4 GW und in 2021 sogar nur 1,9 GW hinzukamen. Deutlich verbessert hat sich indes die Situation bei Genehmigungen für Windenergieanlagen an Land: Mit dem Anstieg der Genehmigungen im Jahr 2023 um 80 Prozent

(im Vergleich zum Vorjahr) auf 8 GW zeichnet sich eine künftige Beschleunigung des Zubaus von Windkraftanlagen an Land ab. Bis Ende August 2024 wurden weitere 7,1 GW neue Windanlagenprojekte genehmigt. Bei der Photovoltaik soll die jährliche Zubaurate ebenfalls schrittweise gesteigert werden und in der zweiten Hälfte der Dekade 22 GW erreichen. Zum Vergleich: Im Jahr 2023 wurden Photovoltaik-Anlagen mit einer Leistung von 14,6 GW installiert nach 7,5 GW im Jahr 2022 und 5,7 GW im Jahr 2021. Die Richtung stimmt also, das Tempo muss aber weiter deutlich beschleunigt werden, insbesondere beim Zubau von Windenergieanlagen an Land.

Ein ausgewogener Mix aus Windenergie und Photovoltaik trägt zu einem effizienten Stromsystem bei, u.a. da beide Technologien sich durch ihre unterschiedlichen Erzeugungsprofile im Zeitver-

**Abbildung 11: Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland gemäß EEG**



lauf gut ergänzen. Der Ersatz großer Mengen Windenergie durch Photovoltaik würde zu mehr Abregelung, höheren Flexibilitäts- und saisonalen Speicherbedarfen und insgesamt höheren Kosten führen.

**Der Kohleausstieg soll idealerweise Anfang der 2030er Jahre erfolgen, Gas- bzw. Wasserstoffkraftwerke sichern mit relativ geringen Benutzungsstunden das Stromsystem in Zeiten mit wenig Wind und Sonne ab.**

Wir gehen davon aus, dass der Kohleausstieg durch den starken Ausbau der erneuerbaren Energien und die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise wirtschaftlich getrieben bereits deutlich vor 2038 vollständig beendet werden kann. Hierfür müssen die erneuerbaren Energien einen wesentlichen Beitrag zur Systemstabilität leisten, damit ein sicherer und robuster Netzbetrieb gewährleistet werden kann.

Als steuerbare thermische Kraftwerke kommen übergangsweise Gaskraftwerke und perspektivisch vor allem Wasserstoffkraftwerke mit und ohne Wärmeauskopplung zum Einsatz. Dementsprechend müssen neue Gaskraftwerke zukünftig auf die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff umgestellt werden können oder direkt mit Wasserstoff betreibbar sein. Die Wasserstoffkraftwerke laufen nur in Zeiten, in denen eine relativ hohe Stromnachfrage auf eine geringe Stromerzeugung aus Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen trifft. Dementsprechend sind zukünftig die Volllaststunden dieser Kraftwerke begrenzt.

Die Wasserstoffkraftwerke sichern zukünftig gemeinsam mit weiteren Flexibilitätsoptionen das Stromsystem in Zeiten mit wenig Wind und Sonne ab. Der genaue Umfang der langfristig erforderlichen Kraftwerksleistung hängt von diversen Faktoren ab. Die notwendige Kraftwerksleistung ist umso geringer, je größer die installierte Leistung

der erneuerbaren Energien ist und je mehr Flexibilitätspotenziale – beispielsweise durch flexible Stromverbraucher oder Batterien und Vehicle-to-Grid – genutzt werden können. Weiterhin können durch Stromhandel innerhalb Europas großräumige Ausgleichseffekte bei der Stromnachfrage und erneuerbaren Stromerzeugung genutzt werden. Dementsprechend variiert die langfristig benötigte Erzeugungsleistung von Wasserstoffkraftwerken in Szenarien erheblich und liegt 2045 in der Größenordnung von 60 bis 80 GW oder mehr. Durch diese steuerbaren Kraftwerke wird im Zusammenspiel mit den weiteren Flexibilitätsoptionen wie flexiblen Verbrauchern, Speichern und Vernetzung mit dem Ausland die Versorgungssicherheit auch bei steigendem Stromverbrauch gewährleistet.

**Die Bedeutung der Biomasse nimmt im Umwandlungssektor ab.**

Im Jahr 2023 wurden aus Biomasse rund 44 TWh Strom erzeugt (rund 8 Prozent des Stromverbrauchs). Zukünftig müssen stoffliche Biomasseanwendungen mit möglichst langfristiger CO<sub>2</sub>-Bindung gestärkt werden, um den Kohlenstoff möglichst lange in biobasierten Produkten und Herstellungsprozessen zu halten, etwa grüne Kohlenstoffquellen für langlebige Industriegüter oder Baumaterial, aber auch als Zwischenprodukte für die chemische Industrie. Die energetische Biomassenutzung sollte auf diejenigen Bereiche fokussiert werden, in denen mittel- bzw. langfristig technisch und/oder wirtschaftlich keine anderen Dekarbonisierungsoptionen (wie z.B. Elektrifizierung und Wasserstoffnutzung) verfügbar sind und in denen die Biomasse ressourcen- und energieeffizient genutzt werden kann. Dies trifft auf Teile der Hochtemperaturprozesswärme, schwer elektrifizierbare Bereiche des Verkehrs, bestimmte Gebäudesegmente (z.B. Denkmalschutz) sowie die Stromerzeugung zum Ausgleich von Spitzenlasten mit

Biogas/-methan zu. In diesen Bereichen hat die Biomassenutzung eine besonders hohe Klimaschutzwirkung, die auf andere Weise nicht oder nur mit unververtretbarem Aufwand erreicht werden kann. Langfristig wird die Stromerzeugung aus Biomasse sinken, da das nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial begrenzt und der Einsatz in anderen Sektoren deutlich wertvoller ist, beispielsweise in der Industrie und in schwer zu dekarbonisierenden Verkehrsbereichen. Im Umwandlungssektor verbleibt im Kern die Gülle, da diese schlecht transportierbar ist und somit häufiger vor Ort verstromt werden wird. Ein flexibler Einsatz der Stromerzeugung aus Biomasse kann zu einer effizienten Nutzung des begrenzten Biomassepotenzials beitragen. Als steuerbare thermische Kraftwerke fungieren perspektivisch im Wesentlichen Wasserstoffkraftwerke.

### **Stromimporte erschließen kostengünstige Stromerzeugungspotenziale im Ausland.**

Deutschland verfügt über gute Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien. Zugleich weist Deutschland als Industrieland und mit einer im europäischen Vergleich hohen Bevölkerungsdichte eine relativ hohe Stromnachfrage auf, die im Zuge der Sektorenkopplung stark steigen wird. Dementsprechend ist nicht nur eine weitgehende Erschließung der inländischen Stromerzeugungspotenziale bedeutsam. Durch die Einbettung Deutschlands in den europäischen Strombinnenmarkt und in das europaweite Stromnetz werden auch erneuerbare Stromerzeugungspotenziale außerhalb Deutschlands genutzt. Die Nutzung dieser Potenziale des europäischen Stromsystems dient vor allem der Kosteneffizienz. Insgesamt wird die Gesamtmenge der Energieimporte – unter Berücksichtigung von Kohle, Öl, Gas – deutlich sinken und so die Unabhängigkeit gestärkt.

## **3.2 Wärmeerzeugung in Wärmenetzen**

### **In Wärmenetzen wird Wärme überwiegend durch Großwärmepumpen erzeugt.**

Wärmenetze sind von zentraler Bedeutung für einen klimaneutralen Gebäudesektor und können zudem die Industrie mit Prozesswärme versorgen. Daher ist der Neu-, Aus- und Umbau der Wärmenetze erforderlich. Bis spätestens 2045 sollen alle Wärmenetze vollständig dekarbonisiert werden. Bereits im Jahr 2030 soll ein Anteil von 50 Prozent Wärme aus erneuerbaren Energien und unvermeidbarer Abwärme stammen. Bezogen auf das Jahr 2021 entspräche dies knapp 70 TWh Wärme. Großwärmepumpen, die insbesondere Umgebungswärme und Abwärme nutzen, Geothermie- und Solarthermieranlagen sowie Wärmespeicher werden zentrale Technologien sein.

Großwärmepumpen weisen besonders hohe Potenziale auf. Sie versorgen Gebäude und die Industrie über Wärmenetze effizient mit Wärme und können Wärmequellen nutzen (bspw. Oberflächengewässer), die durch kleine Wärmepumpen nicht erschlossen werden können. Je nach lokaler Verfügbarkeit können Geothermie, Abwärme und Solarthermie zukünftig signifikante Beiträge zur Wärmebereitstellung in Wärmenetzen liefern. Zukünftig werden neben industrieller Abwärme auch neue Abwärmepotenziale verfügbar sein, beispielsweise durch Rechenzentren. Entsprechende Potenziale sollten jeweils vor Ort im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung geprüft werden.

### **Wasserstoff ergänzt die Wärmeerzeugung in Wärmenetzen.**

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird in einem klimaneutralen Energiesystem eine andere Rolle spielen als bisher. Durch den starken Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor verringert

sich der absolute Bedarf für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme. Wichtig ist KWK in Zeitfenstern, in denen zusätzlicher Strombedarf zur Deckung der Stromnachfrage und gleichzeitig ein Bedarf zur Wärmeerzeugung in Wärmenetzen besteht. Diese Zeitfenster werden mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien seltener. Gleichzeitig müssen Strom- und Wärmeversorgung im Winter in Zeiten mit wenig Wind und Sonne abgesichert werden. Insofern wird die KWK in einem klimaneutralen Energiesystem nicht mehr die Hauptrolle bei der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen übernehmen. Vielmehr wird sie die Wärmebereitstellung durch Großwärmepumpen, Abwärme sowie Geo- und Solarthermie ergänzen. Zudem können Wasserstoffkessel zur Deckung von Spitzenlasten eine Rolle bei der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen spielen.

### 3.3 Wasserstoff und Wasserstoffderivate

#### Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft sollte schnellstmöglich erfolgen.

Die Nachfrage nach Wasserstoff und dessen Derivaten steigt im klimaneutralen Energiesystem stark an. In 2045 werden voraussichtlich 360 bis 500 TWh Wasserstoff benötigt, insbesondere im Industrie- und Umwandlungssektor. Hinzu kommt ein Bedarf an synthetischen Kohlenwasserstoffen von rund 200 TWh und ggf. von weiteren Wasserstoffderivaten. Die Wasserstoffderivate werden in der Industrie und im Verkehr bei Anwendungen benötigt, die einen Kohlenstoffbedarf aufweisen oder eine hohe Energiedichte erfordern, z. B. im Luft- und Seeverkehr.

Angesichts der absehbar stark steigenden Nachfrage nach Wasserstoff und seinen Derivaten soll der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft möglichst schnell erfolgen. Dadurch können zusätzliche CO<sub>2</sub>-

Emissionen vermieden und der Erdgasverbrauch reduziert werden. Beispielsweise kann bei einer hohen Wasserstoffverfügbarkeit die übergangsweise Nutzung von Erdgas als Reduktionsmittel in der Stahlindustrie minimiert werden. So kann möglichst früh ein hoher Anteil von Wasserstoff bei der Direktreduktion eingesetzt werden. Ebenso könnte Wasserstoff frühzeitig Erdgas im Stromsektor ersetzen. Damit der Stromsektor bereits 2035 weitgehend klimaneutral ist, werden wir Wasserstoffkraftwerke als neue Technologie zeitnah erproben. Das setzt ebenfalls eine entsprechende Wasserstoffverfügbarkeit und Wasserstoffinfrastruktur (Netze und Speicher) voraus. Zudem bietet der frühzeitige Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft industriepolitische Chancen beim globalen Wettlauf um grüne Zukunftstechnologien. Dementsprechend sollten 2030 schon rund 60 bis 90 TWh CO<sub>2</sub>-freier Wasserstoff bzw. dessen Derivate durch inländische Erzeugung oder Importe verfügbar sein. Damit könnte ein möglichst hoher Anteil des voraussichtlichen Wasserstoffbedarfs von 95 bis 130 TWh gemäß Nationaler Wasserstoffstrategie mit CO<sub>2</sub>-freiem Wasserstoff bzw. Derivaten gedeckt werden. Bis zur ausreichenden Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff kann dabei auch blauer Wasserstoff zur Emissionsreduktion beitragen.

#### Die inländische Wasserstofferzeugung spielt eine große Rolle und dient der Systemintegration der erneuerbaren Energien.

Bis 2030 sollen nach der Nationalen Wasserstoffstrategie in Deutschland mindestens 10 GW elektrische Elektrolyseleistung installiert sein. Die Elektrolyseure sollten insbesondere in Zeiten einer hohen Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik betrieben werden und so die Systemintegration der erneuerbaren Energien unterstützen. Bei 4.000 Volllaststunden können mit 10 GW elektrischer Elektrolyseleistung unter Berücksichtigung der Umwandlungsverluste jährlich knapp 30 TWh

Wasserstoff erzeugt werden. Die Bundesregierung ist dabei, die erforderlichen Instrumente umzusetzen, um bis 2030 den Betrieb von mindestens 10 GW Elektrolyseleistung anzureizen. Aktuelle Marktentwicklungen deuten darauf hin, dass ein Teil dieser Leistung erst in den Folgejahren in Betrieb genommen werden könnte. Diese Entwicklung gilt es daher weiter genau zu beobachten und flexibel zu reagieren. Bis 2045 sollte die Elektrolyseleistung in Deutschland in Abhängigkeit von der Entwicklung der Wasserstoffnachfrage auf rund 60 bis 80 GWel steigen und so einen substantiellen Teil der Wasserstoffnachfrage decken.

### Die Wasserstoffherzeugung sollte insbesondere in der Nähe der erneuerbaren Stromerzeugung erfolgen.

Elektrolyseure verknüpfen das Strom- und das Wasserstoffsystem, so dass deren Zubau aus systemischer Sicht einer entsprechenden übergreifenden Koordination bedarf. Neben der Betriebsweise und den technischen Eigenschaften sind insbesondere die Standorte der Elektrolyseure zentral für deren Systemintegration. Bei Elektrolyseuren handelt es sich aus Sicht des Stromsystems um Lasten, die potenziell erhebliche Wirkungen auf den Netzbetrieb, die Systemsicherheit und den Netzausbaubedarf haben können. Es ist deshalb zentral, dass insbesondere große Elektrolyseure an systemdienlichen Standorten gebaut werden und eine Betriebsweise und technische Eigenschaften aufweisen, die einen sicheren Netzbetrieb ermöglichen.

Grundsätzlich sind Elektrolysestandorte nördlich der vorherrschenden Nord-Süd-Engpässe im deutschen Übertragungsnetz aus Stromnetz-sicht wesentlich günstiger als südliche Standorte. Die Nordstandorte können teilweise sogar netzentlastend wirken. In Deutschland sind deshalb Standorte im Norden besonders gut für große Elektrolyseure geeignet. Dort können unter anderem die großen Stromer-

zeugungspotenziale der Windenergie an Land und auf See genutzt werden, ohne den Strom über Fernleitungen transportieren zu müssen. Zudem befinden sich geologische Formationen, die für die Wasserstoffspeicherung genutzt werden können, überwiegend in Norddeutschland. Der Wasserstoff kann dann über Pipelines zu den Verbrauchern (z. B. Kraftwerke und Industrieunternehmen) transportiert werden, die an das Wasserstoffnetz angeschlossen sind.

Die zukünftige Wasserstoffinfrastruktur verbindet die Erzeugungsregionen mit den Verbrauchszentren und Wasserstoffspeichern. Es ist ein zügiger Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur und der Wasserstoffspeicher erforderlich, um auch die Verbraucher fernab der Erzeugungsregionen bereits mittelfristig sicher und zuverlässig mit Wasserstoff zu versorgen, beispielsweise Wasserstoffkraftwerke und industrielle Wasserstoffverbraucher im Süden Deutschlands.

Im Sinne eines zügigen Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft sollte – insbesondere bis die Wasserstofftransportinfrastruktur und Wasserstoffspeicher verfügbar sind – ein Aufbau von Elektrolysekapazitäten aber auch im restlichen Bundesgebiet erfolgen, vor allem an Industriestandorten.

### Ein großer Teil des Wasserstoffbedarfs wird perspektivisch durch Importe aus Europa gedeckt.

Angesichts des erheblichen Wasserstoffbedarfs wird Deutschland trotz einer umfangreichen inländischen Erzeugung rund 50 bis 70 Prozent und damit den überwiegenden Teil seines Wasserstoffbedarfs importieren. Je höher der Wasserstoffbedarf letztlich ausfällt, umso höher wird tendenziell die Importquote sein, da die kostengünstigen inländischen Stromerzeugungspotenziale begrenzt sind. Der Import von Wasserstoff kann dabei perspektivisch in großen Teilen leitungsgebunden aus Europa



bzw. angrenzenden Regionen erfolgen (siehe Abbildung 12). Europa besitzt umfangreiche Potenziale zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die auch für die Wasserstoffherzeugung genutzt werden sollten.

Der Transport von molekularem Wasserstoff per Schiff ist zumindest aus heutiger Sicht absehbar herausfordernd, da der Siedepunkt von Wasserstoff nochmals rund 100 Kelvin geringer ist als bei Erdgas (LNG). Ebenso ist die Umwandlung von Wasserstoff in ein anderes Transportmedium, z. B. Ammoniak oder LOHC (liquid-organic hydrogen carrier), und die anschließende Rekonversion mit erheblichen Umwandlungsverlusten verbunden. Unter Berücksichtigung der Transportkosten und Umwandlungsverluste ist die innereuropäische bzw. europäische Wasserstoffherzeugung in Verbindung mit einem Pipeline-Transport energetisch effizient. Schiffs-transporte sollen in einer Diversifizierungsstrategie dennoch weiterhin ein wichtiges Element bilden.

Zur Deckung der europäischen Wasserstoffnachfrage werden 2045 in Europa und angrenzenden Regionen mindestens 400 GW wasserstoffseitige Elektrolysekapazität benötigt, dies entspricht einer elektrischen Leistung von etwa 570 GW (bei einem Wirkungsgrad von 70 Prozent). Bei einer hohen Wasserstoffnachfrage kann die wasserstoffseitige Elektrolysekapazität sogar noch deutlich höher ausfallen (Größenordnung: 600–800 GW). Für eine europäische Wasserstoffherzeugung müssen entsprechende Stromerzeugungspotenziale zügig erschlossen und eine entsprechende Wasserstoffinfrastruktur für den Transport geschaffen werden. Wichtige Standorte für die Stromerzeugung für die Elektrolyse sind Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee sowie günstige Wind Onshore/Solar-Kombinations-Standorte in Ost- und Südeuropa oder angrenzenden Regionen wie dem Nahen Osten oder Nordafrika.

### Viele Wasserstoffderivate werden angesichts ihrer geringen Transportkosten vor allem außerhalb Europas erzeugt und importiert.

Bei Wasserstoffderivaten ist angesichts der höheren Umwandlungsverluste bei der Produktion die Bedeutung der Erzeugungskosten größer als bei Wasserstoff. Zugleich sind die Transportkosten aufgrund der guten Transportfähigkeit von Wasserstoffderivaten geringer. Dementsprechend werden viele Wasserstoffderivate vorwiegend in Regionen mit besonders kostengünstigen Erzeugungspotenzialen außerhalb Europas hergestellt und von dort importiert. In welchem Umfang der Import von Wasserstoffderivaten erfolgen wird, hängt stark von den Bedarfen im Verkehrssektor und der Struktur der Wertschöpfungsketten in der Industrie ab.

**Abbildung 12: Schematische Darstellung europäischer Importkorridore**



### 3.4 Energieimporte und Energiehandel

**Deutschland wird auch zukünftig Energie importieren, jedoch sinkt die Importabhängigkeit gegenüber heute deutlich.**

Aktuell werden rund 70 Prozent des Primärenergieverbrauchs durch Importe gedeckt. Importiert werden insbesondere Mineralöl, Erdgas und Steinkohle. Steinkohle wird seit Beendigung der inländischen Steinkohleförderung vollständig aus dem Ausland bezogen. Ebenso werden die mengenmäßig bedeutsameren Energieträger Mineralöl (rund 98 Prozent) und Erdgas (rund 95 Prozent) nahezu vollständig aus dem Ausland eingeführt.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien und Steigerungen der Energieeffizienz reduzieren zukünftig

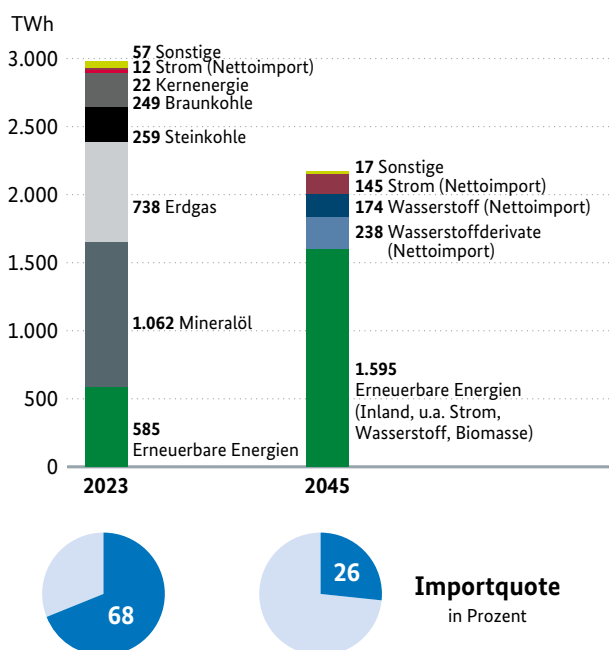
die Abhängigkeit von Energieimporten deutlich und erhöhen so die Versorgungssicherheit (Abbildung 13). Unter anderem aus Gründen der Kosteneffizienz wird Deutschland zwar auch langfristig Energie importieren, aber deutlich weniger als bisher. Anstelle von fossilen Energieträgern werden zunehmend Strom und Wasserstoff sowie Wasserstoffderivate auf Basis erneuerbarer Energien importiert. Insgesamt verringert sich die Importquote bis 2045 deutlich auf unter 30 Prozent.

**Eine Diversifizierung der Energieimporte über verschiedene Importregionen sollte angestrebt werden.**

Im Sinne der Versorgungssicherheit sollte für die verbleibenden Energieimporte eine große Vielfalt an Lieferländern und Transportstrukturen angestrebt werden. Durch eine solche Diversifizierung werden Importabhängigkeiten wie in der Vergangenheit vermieden. Der Anteil von Erdgas aus Russland am deutschen Erdgasbedarf etwa lag 2021 bei rund 55 Prozent.

Durch die stärkere Nutzung von Strom und Wasserstoff werden verbleibende Energieimporte zudem verstärkt aus Ländern der Europäischen Union bezogen. Die Energiewende verbessert so Deutschlands Sicherheit. In Europa wurden im Zuge des europäischen Green Deal ambitionierte Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien verankert. Da das letztliche Ausbauniveau der erneuerbaren Energien und der Aufbau der Transportachsen insbesondere für Wasserstoff in Europa noch unsicher sind, sollten darüber hinaus auch weitere Importoptionen geschaffen werden. Für Wasserstoffimporte könnten europäische Regionen, z. B. Nordafrika und der Nahe Osten, per Pipeline angebunden werden. Bei Wasserstoffderivaten ist angesichts der geringen Transportkosten und der Erzeugungsvorteile in besonders wind- und sonnenreichen Regionen ohnehin ein Import

**Abbildung 13: Entwicklung Primärenergieverbrauch und Importquote**



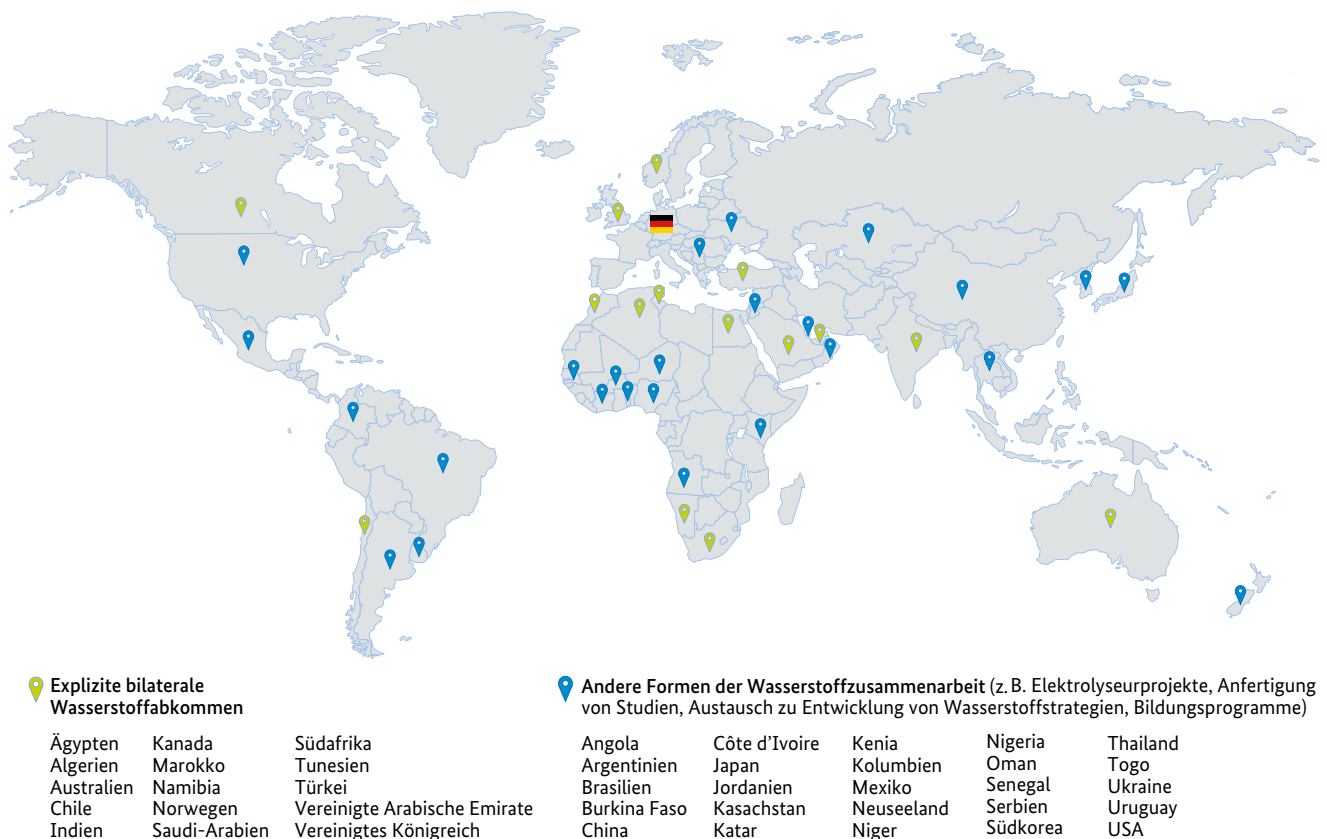
Quelle: AG Energiebilanzen (links) und BMWK-Langfristszenarien (O45-Strom, rechts)

aus anderen Weltregionen sinnvoll, wobei auch hier eine starke Diversifizierung angestrebt wird (Abbildung 14). Dabei wird von vornherein auch eine Stärkung der eigenen Entwicklungsperspektiven der Exportländer in den Blick genommen, um nachhaltige und sichere Energiepartnerschaften zu etablieren. Bei entsprechenden Fortschritten der Transporttechnologie könnte auch der Schiffs-transport von Wasserstoff eine Option sein und zu einer weiteren Diversifizierung der Importrouten beitragen.

### Energiehandel erhöht die Versorgungssicherheit und senkt die Kosten.

Energiehandel ermöglicht nicht nur den (Netto-)Import von Energieträgern aus Regionen mit günstigeren Erzeugungskosten. Wechselseitiger Energiehandel erhöht die Versorgungssicherheit der Märkte, da unterschiedliche zeitliche Erzeugungs- und Nachfrageprofile geglättet und weitere Flexibilitätspotenziale wie Energiespeicher (z. B. Nutzung von Wasserkraftspeichern in den Alpen oder Skandinavien) großräumig erschlossen werden. Gleichzeitig muss ein erhöhter Stromhandel netzbetrieblich sicher umgesetzt werden können, wodurch Kosten entstehen. Hier muss ein Optimum angestrebt werden.

**Abbildung 14: Bilaterale Wasserstoff-Kooperationen der Bundesregierung in Nicht-EU-Ländern**





Durch den Handel mit Strom können die umfangreichen Potenziale für erneuerbare Energien in Europa effizient genutzt werden. Durch den großräumigen Ausgleich werden Unterschiede bei der Erzeugung aus variablen erneuerbaren Energien ausgeglichen. Beispielsweise treten Windflauten in der Regel regional beschränkt auf. Ebenso wird die Stromerzeugung aus Photovoltaik geglättet, da zum Beispiel die Sonne im Osten früher aufgeht und im Westen später untergeht oder Wolkenfelder nur regional vorhanden sind. Durch Stromhandel kann der erneuerbare Strom von dort, wo wetterbedingt mehr erneuerbare Energien erzeugt werden, dorthin transportiert werden, wo dieser Strom jeweils benötigt wird.

Ebenso weist die Stromnachfrage in Europa zwischen den Ländern ein unterschiedliches zeitliches Profil auf. Beispielsweise wird im Winter in Nordeuropa früher Licht benötigt und in Südeuropa abends später gekocht. Durch den großräumigen Ausgleich können daher die Zeiträume, in denen die Stromnachfrage nicht durch Wind- und PV-Strom gedeckt werden kann, deutlich reduziert werden. Stromhandel verringert dementsprechend den Bedarf an steuerbarer Kraftwerksleistung und die Einsatzzeiten dieser Kraftwerke. So können große Mengen erneuerbarer Energien kosteneffizient integriert und die Versorgungssicherheit erhöht werden.

Wasserstoff wird in Europa insbesondere aus den Randlagen in die Nachfragezentren transportiert werden, was entsprechende Transportinfrastrukturen aus diesen Regionen nach Zentraleuropa erfordert. Günstige Potenziale für die Wasserstoffherstellung bestehen in der Nord- und Ostsee, auf der Iberischen Halbinsel und entlang der Atlantikküste, z. B. den Britischen Inseln, Skandinavien und Frankreich. Ebenso verfügt Osteuropa, z. B. Polen oder die Ukraine, über umfangreiche Stromerzeugungspotenziale aus erneuerbaren Energien und könnte zukünftig Wasserstoff exportieren.

Insgesamt sollten die Transportinfrastrukturen für Strom und Wasserstoff daher auf einen zunehmenden Energiehandel in Europa ausgelegt werden und den Import aus verschiedenen Regionen ermöglichen. Durch die Einbindung von Häfen in die Transportstrukturen werden zudem auch außereuropäische Wasserstoffimporte per Schiff ermöglicht.

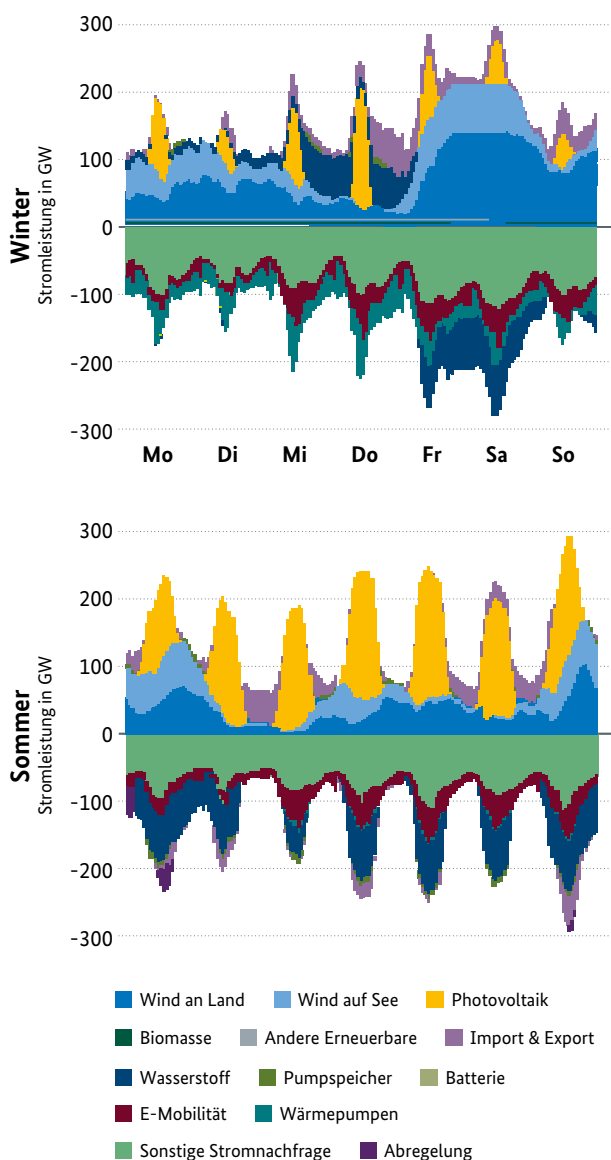
### 3.5 Flexibilität und Speicher

#### Elektrolyseure, Elektromobilität und Wärmepumpen bieten große nachfrageseitige Flexibilitätspotenziale.

Neben den auf Preissignale reagierenden Wasserstoffkraftwerken und dem großräumigen Ausgleich durch ein ausgebautes und optimiertes Stromnetz ist ein hohes Maß an Flexibilität auch bei der Energienachfrage erforderlich. Neue, flexible Stromverbraucher gleichen zeitliche Ungleichgewichte zwischen Erzeugung und Verbrauch aus (Abbildung 15). Elektrolyseure, Wärmepumpen und Elektroautos bieten in Zukunft große, kurzfristige Flexibilitätspotenziale. Elektrolyseure sollten in Zeiten einer hohen Stromerzeugung und gleichzeitig geringer Nachfrage Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugen. Elektroautos können unter Berücksichtigung ihrer Fahrprofile flexibel geladen werden. Wärmepumpen bieten angesichts der thermischen Trägheit von gut gedämmten Gebäuden und in Verbindung mit Wärmespeichern ebenfalls kurzfristige Flexibilitätspotenziale. Dementsprechend sollte sich der Einsatz dieser Sektorenkopplungstechnologien zukünftig sowohl an der Erzeugung aus erneuerbaren Energien als auch an der verfügbaren Netzkapazität orientieren. In der Abbildung unten ist diese Flexibilität jeweils beispielhaft für eine Winter- und Sommerwoche im Jahr 2045 illustriert. Des Weiteren müssen zukünftig flexible Verbrauchsanlagen einen Beitrag zur Systemstabilität leisten. Hierfür müssen die techni-

schen Anforderungen an die Anlagen weiterentwickelt werden. Um Flexibilitätpotenziale so schnell wie möglich erschließen zu können, ist unter anderem der schnelle Roll-out von intelligenten Messsystemen mit Smart-Meter-Gateway essenziell.

**Abbildung 15: Exemplarische Stromerzeugung und -verbrauch im Wochenverlauf im Jahr 2045**



Quelle: BMWK-Langfristszenarien

### Stromspeicher stellen zusätzliche Flexibilitätpotenziale bereit.

Stationäre Batteriespeicher spielen eine zunehmend wichtige Rolle im Energiesystem. Aufgrund der hohen privaten Nachfrage ist mit einer weiterhin starken Zunahme kleiner, stationärer Batteriespeicher zu rechnen, insbesondere in Verbindung mit Aufdach-PV-Anlagen. Auch Großbatterien werden derzeit in erheblichem Umfang zugebaut. Sie werden unter anderem dafür eingesetzt, Systemdienstleistungen bereitzustellen oder um in Verbindung mit erneuerbaren Erzeugungsanlagen das Energieangebot über Stunden oder Tage hinweg zeitlich zu verschieben. Zudem werden nach vielen Jahren der Stagnation nun wieder Pumpspeicherprojekte begonnen oder fortgesetzt. Um einen gesamtsystemisch sinnvollen Betrieb von Stromspeichern und anderen Flexibilitätsoptionen sicherzustellen, bedarf es adäquater Rahmenbedingungen. Der langfristige Bedarf für stationäre Stromspeicher hängt insbesondere davon ab, in welchem Umfang auch die Batterien in Elektrofahrzeugen systemisch genutzt werden können (bidirektionales Laden), welcher Anteil des Stroms während Erzeugungsspitzen (bspw. während sonnen- und windreicher Mittagsstunden) für zeitlich verschiebbare Lasten wie Elektrolyseure genutzt wird, und wie sich der internationale Stromhandel entwickelt. Denn durch eine stärkere internationale Vernetzung können regionale Unterschiede in der Stromerzeugung besser ausgeglichen werden. Das reduziert den Speicherbedarf.

### Wärmespeicher sind zentrale Bausteine in Wärmenetzen.

Wärmespeicher bieten umfangreiche Flexibilität in Wärmenetzen. Deshalb wächst der Bedarf an Wärmespeichern im Energiesystem der Zukunft stark an. Großwärmepumpen bieten in Verbindung mit Wärmespeichern erhebliche Flexibilitätpotenziale

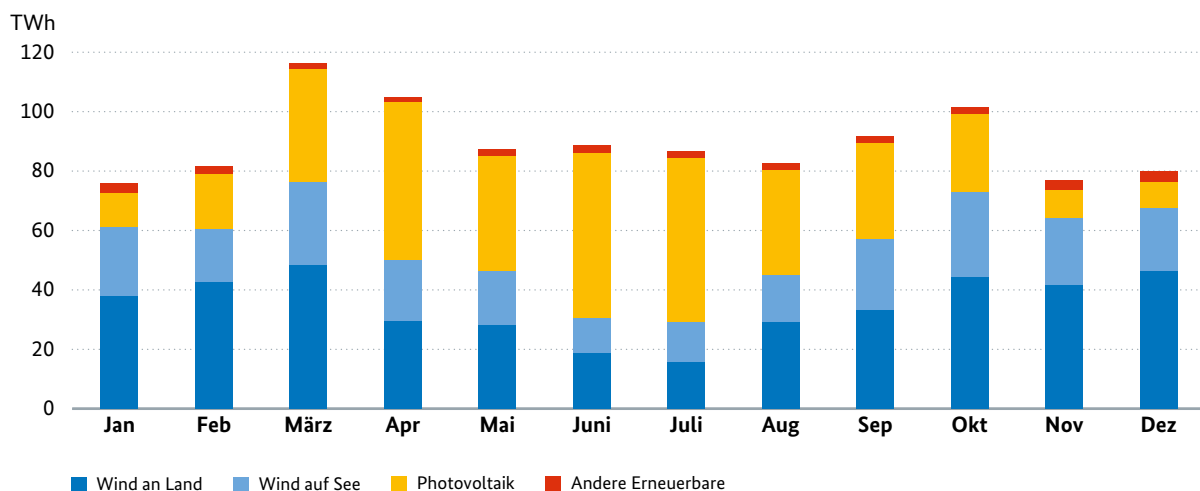
für das Stromsystem, indem sie vor allem in Zeiten temporärer Erzeugungsüberschüsse aus erneuerbaren Energien betrieben werden. So können z.B. Überschüsse aus der PV-Stromerzeugung in das Energiesystem integriert und in Form von Wärme gespeichert werden. Darüber hinaus können Wärmespeicher auch in der Industrie eine wichtige Rolle zur Flexibilisierung der Energienachfrage spielen.

**Wasserstoffspeicher gleichen saisonale Schwankungen aus und tragen zur Versorgungssicherheit bei.**

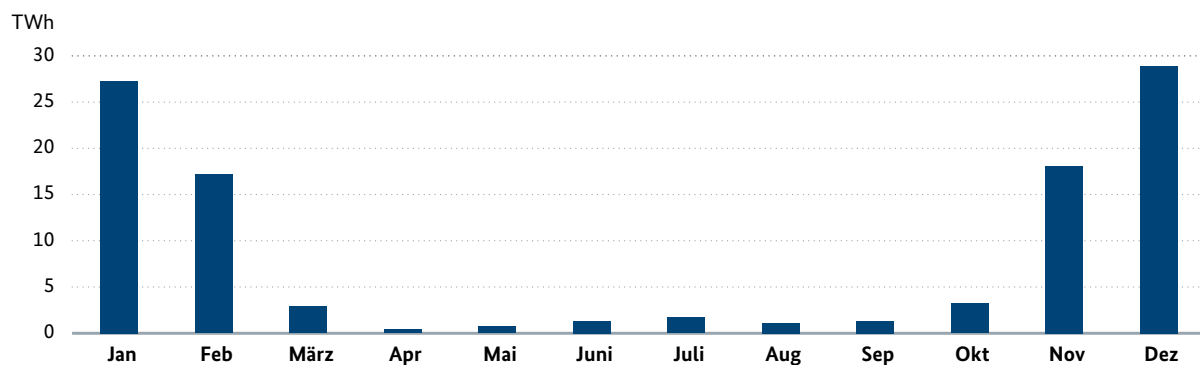
Wasserstoffspeicher werden perspektivisch energetisch die bedeutsamste Speichertechnologie sein und dienen als saisonaler Langfristspeicher. Wasserstoffspeicher sind neben der Absicherung der Wasserstoffnachfrage in den Verbrauchssektoren insbesondere auch für die Versorgungssicherheit

**Abbildung 16: Stromerzeugung und Wasserstoffverbrauch für die Rückverstromung in Deutschland im Jahre 2045**

**Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 2045  
(ohne H2-Kraftwerke)**



**Wasserstoffverbrauch für die Rückverstromung 2045**



Quelle: Szenario O45-Strom der BMWK-Langfristszenarien

im Stromsektor zentral. Im Gegensatz zur Wasserstoffnachfrage in der Industrie, die zeitlich relativ stetig ist, weist die Wasserstoffnachfrage im Umwandlungssektor ein stark saisonales Profil auf.

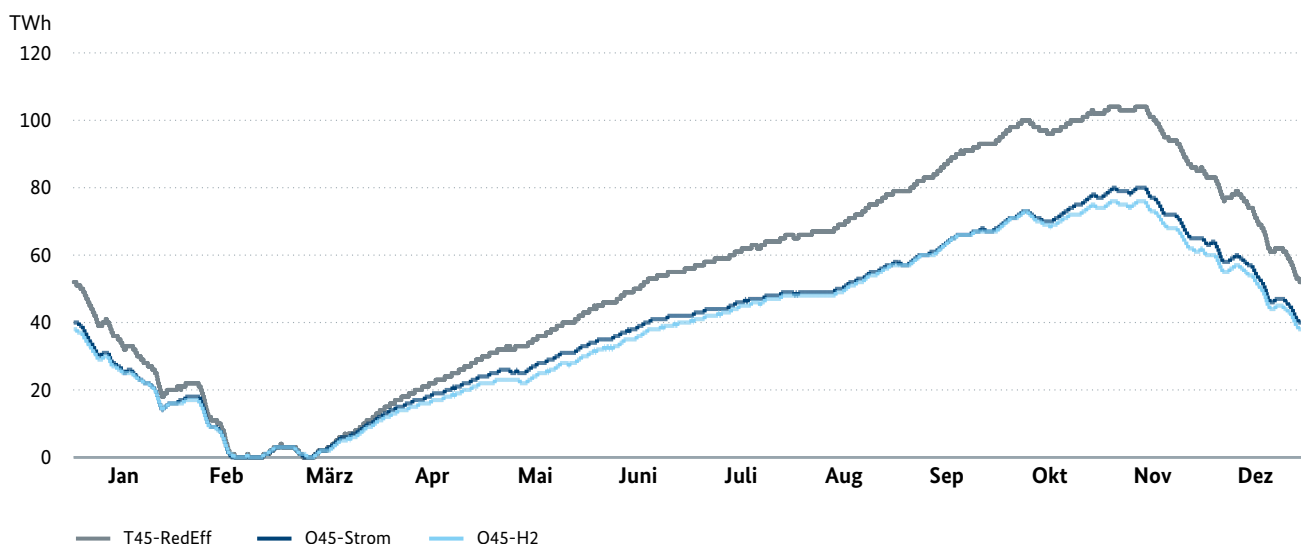
Wasserstoffkraftwerke ergänzen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien insbesondere in den Wintermonaten (siehe Abbildung 16). Hintergrund ist einerseits die höhere Stromnachfrage im Winter, z. B. für Beleuchtung und Wärmepumpen, andererseits das zeitliche Stromerzeugungsprofil der erneuerbaren Energien. Zwar ergänzt sich die Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik grundsätzlich sehr gut: Der Wind weht stärker im Winterhalbjahr, während mehr Strom aus Photovoltaik im Sommerhalbjahr erzeugt wird. Insgesamt fällt die erneuerbare Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik aufgrund des geringeren Beitrags der Photovoltaik in den Wintermonaten jedoch geringer aus. Das zeitliche Stromerzeugungsprofil verdeutlicht die hohe Bedeutung des Windenergieausbaus für die Energiewende. Denn die ergänzende Stromerzeugung aus Wasserstoff

geht mit deutlich höheren Kosten einher als die direkte Windverstromung. Je mehr Windenergie erzeugt wird, desto weniger Wasserstoff muss in den Wintermonaten teuer verstromt werden.

### Die Wasserstoffspeicherung erfordert die Erschließung neuer Kavernen.

Im Zuge der Transformation der Verbrauchssektoren und des Aufbaus von Wasserstoffkraftwerken bildet sich ein starkes saisonales Profil der Wasserstoffnachfrage und -erzeugung heraus. Die Einspeicherung erfolgt hauptsächlich von Frühling bis Herbst (siehe Abbildung 17). Im Winter werden große Energiemengen aus den Speichern entnommen, insbesondere um die Versorgung von Wasserstoffkraftwerken sicherzustellen. Das notwendige Arbeitsgasvolumen in Deutschland liegt 2045 in den Langfristszenarien zwischen 80 bis 100 TWh. In Europa werden Wasserstoffspeicher mit einem Arbeitsgasvolumen in der Größenordnung von 220–240 TWh benötigt. Speicherbedarfe entstehen sowohl in Import- als auch Exportländern, um

**Abbildung 17: Füllstand der Wasserstoffspeicher in Deutschland im Jahr 2045 in den BMWK-Langfristszenarien**



einen effizienten Ausbau der europäischen Wasserstoff-Transportinfrastrukturen zu ermöglichen. Eine enge Abstimmung mit den europäischen Nachbarländern zur Erschließung von Wasserstoffspeichern ist daher von großer Bedeutung.

Erste Speicherbedarfe entstehen schon bis 2030. Mit zunehmender Bedeutung der Wasserstoffkraftwerke, einer wachsenden industriellen Wasserstoffnachfrage sowie einer stark steigenden Wasserstofferzeugung aus Elektrolyse wächst der Bedarf für Speicher im Zeitverlauf stark an. Von großer Bedeutung für die Energiewende ist daher eine koordinierte Umstellung der Nachfrageseite (insbesondere der Kraftwerke), der Speicher sowie des Gastransportnetzes auf Wasserstoff.

Wasserstoffspeicher können teilweise durch die Umnutzung aktueller Erdgasspeicher und zu einem gewissen Grad auch von Mineralölspeichern erschlossen werden. Deutschland verfügt über Erdgasspeicher mit einem Gesamtvolumen von rund 250 TWh. Allerdings wird eine reine Umnutzung bestehender Erdgasspeicher bereits ab Mitte der 2030er Jahre nicht ausreichen, um die entstehenden Bedarfe zu decken. Dies liegt unter anderem daran, dass Wasserstoff eine deutlich geringere Energiedichte als Erdgas aufweist. Deshalb kann nur etwa ein Fünftel der Energie als Wasserstoff in bestehenden Erdgasspeichern gespeichert werden. Zudem darf die Umwidmung von Erdgasspeichern die kurz- und mittelfristige Versorgungssicherheit mit Erdgas nicht gefährden. Dabei ist noch unklar, welche bestehenden Erdgasspeicher wann umge-

### Zentrale Instrumente zur Transformation des Energieangebots

Zentrale Instrumente konnten bereits auf den Weg gebracht werden bzw. befinden sich in Vorbereitung:

- Mit dem novellierten **Erneuerbare-Energien-Gesetz** und **Windenergie-auf-See-Gesetz** wurden die Ausbauziele für die erneuerbaren Energien deutlich angehoben und die Rahmenbedingungen für den Ausbau verbessert. Die nach **Vollendung des Kohleausstiegs** angestrebte Treibhausgasneutralität der Stromversorgung wurde gesetzlich verankert. Der Grundsatz, dass die Nutzung der erneuerbaren Energien im überragenden öffentlichen Interesse liegt und der öffentlichen Sicherheit dient, ist nun ebenso gesetzlich festgelegt. Mit dem **Windenergie-an-Land-Gesetz** wurden den Bundesländern verbindliche Flächenziele vorgegeben. Danach müssen bis Ende 2032 zwei Prozent der Landesfläche Deutschlands für die Windenergie ausgewiesen werden. Bundes einheitliche Standards für die artenschutzrechtliche Prüfung ermöglichen schnellere und rechtssichere Verfahren für den Ausbau der Windenergie an Land. Weitere Maßnahmen zur Beschleunigung des Ausbaus der erneuerbaren Energien und Umsetzung der gesetzlich beschlossenen Ausbauziele befinden sich in Ausarbeitung und sind u. a. im Solarpaket bereits enthalten.
- Zur Förderung von Wasserstoffkraftwerken erarbeiten wir ein **Kraftwerkssicherheitsgesetz** und einen Kapazitätsmechanismus. Im Vorgriff auf einen umfassenden **Kapazitätsmechanismus** werden insgesamt 12,5 GW an Kraftwerkskapazität und 500 MW an Langzeitspeichern ausge-

schrieben. Die Kraftwerke sollen überwiegend im sog. netztechnischen Süden Deutschlands zugebaut werden, um Redispatchkosten zu senken und zur Netzstabilität beizutragen. Parallel haben wir ein Optionenpapier für die Ausgestaltungsvarianten des Kapazitätsmechanismus und deren zentrale Vor- und Nachteile vorgelegt. Dieses wird im Rahmen der Plattform Klimaneutrales Stromsystem konsultiert. Der umfassende Kapazitätsmechanismus soll 2028 operativ sein.

- Mit der **Plattform Klimaneutrales Stromsystem** entwickeln wir gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft ein neues Strommarktdesign. Mit diesem wollen wir die Finanzierung der erneuerbaren Energien und steuerbarer Leistung wie Wasserstoffkraftwerke dauerhaft gewährleisten und Flexibilitätsoptionen systemoptimal integrieren. Mit dem **Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende** beschleunigen wir den Smart-Meter-Rollout und schaffen so die technischen Voraussetzungen, um nachfrageseitige Flexibilitätspotenziale zu heben.
- In der **Roadmap Systemstabilität** hat die Bundesregierung in einem breiten Branchenprozess erstmals den Handlungsbedarf im Bereich Systemstabilität systematisch strukturiert. Die Roadmap zeigt, wie sich ein sicherer und robuster Systembetrieb mit 100 Prozent erneuerbaren Energien erreichen lässt. Dabei legt sie konkrete Maßnahmen und Umsetzungsschritte fest. Insgesamt wurden hierfür 51 Prozesse identifiziert und 18 zentrale Meilensteine bis zum Jahr 2030 festgelegt. Zur Koordinierung der Umsetzung mit der Branche wurde das **Forum Systemstabilität** geschaffen.
- Den Neu-, Aus- und Umbau der Wärmenetze und die damit verbundene Umstellung der Wärmeerzeugung auf klimaneutrale Energieträger unterstützen wir mit der **Bundesförderung für effiziente Wärmenetze**. Das Programm umfasst Förderung für investive Maßnahmen zum Neu-, Aus- und Umbau der Wärmenetze sowie Betriebskostenförderung für Großwärmepumpen und Solarthermieanlagen.
- Für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft haben wir die **Nationale Wasserstoffstrategie** fortentwickelt. Wir haben unter anderem das Ausbauziel für nationale Elektrolysekapazitäten bis 2030 auf 10 GW verdoppelt. Mit den IPCEI-Wasserstoffprojekten fördern wir mit bis zu 13,5 Mrd. Euro neben Infrastrukturprojekten auch Technologieprojekte bspw. im Industrie- und Verkehrssektor. Zudem haben wir das **Wasserstoffbeschleunigungsgesetz** vorgelegt. Dieses Gesetz macht die Planungs-, Genehmigungs- und Vergabeverfahren für Infrastrukturvorhaben, die Wasserstoff erzeugen, speichern oder importieren, schneller, einfacher und digitaler. Für den Import von Wasserstoff und dessen Derivaten haben wir eine **Importstrategie** vorgelegt. Parallel stellen wir die Zusammenarbeit zu grünem Wasserstoff stärker in den Fokus bestehender und neuer Energiepartnerschaften. Über **H2Global** organisieren wir bereits den Import von Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivaten. Zudem erarbeiten wir eine Wasserstoffspeicherstrategie, um frühzeitig den Neubau von umfangreichen Kavernenspeicherkapazitäten anzustoßen und Finanzierungsmodelle zu entwickeln. Eine **zentrale Anlaufstelle zur Förderberatung** haben wir zur besseren Orientierung über die bestehenden und noch entstehenden Förderprogramme unter [www.nationale-wasserstoffstrategie.de](http://www.nationale-wasserstoffstrategie.de) eingerichtet.



rüstet werden können. Insbesondere bei Porenspeichern müssen laufende Untersuchungen die Eignung für die Wasserstoffspeicherung noch belegen.

Vor diesem Hintergrund müssen frühzeitig erhebliche Speicherkapazitäten für Wasserstoff geschaffen und neue Kavernen erschlossen werden. Angesichts des Zeitbedarfs für die Erschließung neuer Kavernen von teilweise über zehn Jahren und einer Umstellungsdauer von teils über fünf Jahren muss dies frühzeitig angegangen werden. Die Wasserstoffspeicherstrategie der Bundesregierung wird aktuell erarbeitet und schafft eine Grundlage für die Erschließung der nötigen Wasserstoffspeicherkapazitäten.

## 4. Infrastrukturen



### Die zukünftige Energieversorgung erfolgt überwiegend leitungsgebunden.

Im Energiesystem der Zukunft steigen die Anforderungen an die Energieinfrastrukturen. Im Jahr 2045 werden mit Strom und Wasserstoff vor allem Energieträger genutzt, die Netzinfrastrukturen erfordern. Darüber hinaus gewinnen im Energiesystem der Zukunft Wärmenetze in der Wärmeversorgung an Bedeutung. Der Aus- und Umbau der Energieinfrastrukturen macht deshalb die Transformation des Energiesystems erst möglich und trägt wesentlich zu einem effizienten und sicheren Energiesystem bei. Weichenstellungen im Bereich Infrastruktur sind bereits heute notwendig, um Planungssicherheit zu schaffen und um einen rechtzeitigen Ausbau zu ermöglichen.

### Die Planung der Transportinfrastrukturen für Strom und Wasserstoff sollte ausreichend Flexibilität bieten und Ansprüchen an Resilienz genügen.

Die zunehmende Bedeutung von Strom und Wasserstoff erfordert einen erheblichen Ausbau der Stromnetze und den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur. Die Planung und Realisierung entsprechender Infrastrukturvorhaben benötigt trotz Maßnahmen zur Beschleunigung erhebliche Zeit. Zugleich bestehen teilweise Unsicherheiten hinsichtlich der genauen zukünftigen Anforderungen an die Energieinfrastrukturen. Dies betrifft beispielsweise die zukünftige Entwicklung der Nachfrage nach einzelnen Energieträgern durch die energieintensive Industrie und die Verortung von Angebot und Nachfrage in Deutschland. Unklar ist zudem, in welchem Umfang welche Energieträger aus welchen Regionen importiert werden. Die Planung der Infrastrukturen wird zudem dadurch erschwert, dass Deutschland nur begrenzten Einfluss auf die tatsächliche Entwicklung der Regionen hat, die zukünftig potenziell Energie exportieren können.

Vor diesem Hintergrund sollten die Infrastrukturen für den Energietransport ausreichend Flexibilität für unterschiedliche mögliche Entwicklungen bieten. Das gilt sowohl im Hinblick auf die Verortung des zukünftigen inländischen Angebots und der Nachfrage als auch im Hinblick auf zukünftige Erzeugungs- und Importregionen. Dementsprechend sollten Transportinfrastrukturen Lieferwege aus verschiedenen Erzeugungsregionen erschließen. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für die zukünftige Diversifizierung von Energieimporten. Infrastrukturelle Abhängigkeiten, wie es in der Vergangenheit insbesondere mit den Erdgasimporten aus Russland der Fall gewesen ist, können so vermieden werden. Dafür sind die Schaffung alternativer Importoptionen und der hierfür erforderlichen Infrastrukturen vonnöten. Ferner sollten die Infrastrukturen für den Transport von Strom und Wasserstoff krisenfest dimensioniert werden. Auch bei einem Wegfall einzelner Lieferanten, Importkorridore und von Leitungen bzw. Pipelines muss die Versorgungssicherheit gewahrt bleiben. Dies erhöht die Resilienz des zukünftigen Energiesystems, auch gegenüber Ereignissen wie Naturkatastrophen, Sabotageakten und Terroranschlägen.

## 4.1 Stromnetze

### Das Stromübertragungsnetz muss in Deutschland und Europa stark ausgebaut werden.

Das Stromübertragungsnetz verbindet die Erzeugungs- mit den Nachfragerregionen und ermöglicht den großräumigen Ausgleich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Es muss daher in Deutschland und grenzübergreifend stark ausgebaut werden, wobei netzbetriebliche Aspekte zu berücksichtigen sind.

Die Planung der grenzüberschreitenden Stromaustauschkapazitäten (Interkonnektoren) muss dafür

fortentwickelt werden. Die Langfristszenarien deuten darauf hin, dass ein Ausbau der deutschen Austauschkapazitäten mit den elektrischen Nachbarn auf 80 bis 90 GW sinnvoll sein kann. Mit allen bisher bekannten Planungen, welche sich teilweise noch in einem sehr frühen Stadium befinden, ergibt sich eine Austauschkapazität von schätzungsweise 60 GW. Der Bedarf und Nutzen zusätzlicher Interkonnektoren sollte daher in der Netzplanung geprüft werden, wobei die Auswirkungen auf Netzeingänge und die Stabilität des Stromsystems bei der Dimensionierung berücksichtigt werden müssen.

Ebenso besteht innerhalb Deutschlands ein erheblicher Ausbaubedarf im Stromübertragungsnetz. Der Netzentwicklungsplan (NEP) Strom 2023 verdeutlicht erstmals die Aus- und Umbaubedarfe des Übertragungsnetzes bis 2045. Insgesamt werden Netzverstärkungs- und Ausbaumaßnahmen mit einer Trassenlänge von rund 20.000 km benötigt. Etwa die Hälfte davon sind Netzverstärkungen (Umbeseilungen und Ersatzneubau in bestehenden Trassen). Der Ausbaubedarf fällt aufgrund der beschleunigten Transformation und dem schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien bereits bis 2037 an. Die Langfristszenarien identifizieren einen Ausbaubedarf in ähnlicher Größenordnung. Abweichungen in der Netztopologie entstehen aufgrund unterschiedlicher Annahmen zur Regionalisierung, insbesondere des Ausbaus der erneuerbaren Energien, und den Interkonnektorkapazitäten. Hier bestehen noch Unsicherheiten, die regelmäßig überprüft werden.

Maßnahmen zur Netzverstärkung und -optimierung werden konsequent geprüft und umgesetzt werden, um kurzfristig bereits die Transportkapazität der Stromnetze zu erhöhen und langfristig den Stromnetzausbaubedarf zu begrenzen.

### Die Stromverteilnetze müssen für den Anschluss von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen sowie neuer Stromverbraucher stark ausgebaut werden.

Windenergieanlagen an Land sowie Photovoltaikanlagen werden in der Regel an die Stromverteilnetze angeschlossen. Ferner müssen neue Stromverbraucher wie Ladestationen für Elektromobilität und Wärmepumpen in die Verteilnetze integriert werden. Dies erhöht die Anforderungen an die Stromverteilnetze erheblich.

Die Stromverteilnetze müssen deshalb flächendeckend stark und schnell ausgebaut werden. Es besteht ein sehr hoher Investitionsbedarf. Gemäß Langfristszenarien werden sich die Verteilnetzkosten im Vergleich zu heute mehr als verdoppeln. Die Ergebnisse der Szenarien decken sich mit den erstmals durch die Verteilnetzbetreiber vorgelegten Netzausbauplänen. Diese identifizieren ebenfalls erhebliche Ausbaubedarfe. Allerdings ist das nicht gleichbedeutend mit einer Verdopplung der Netzentgelte. Da der Stromverbrauch zukünftig stark steigt, können die Netzkosten auf eine deutlich größere Strommenge umgelegt werden.

Durch die auch verteilnetzorientierte Nutzung von Flexibilitäten auf den unteren Spannungsebenen können insbesondere auslegungsrelevante Residuallastspitzen reduziert werden. Dadurch kann der Netzausbaubedarf etwas gesenkt bzw. zeitlich verschoben werden. Die Szenarien zeigen jedoch auch unter dieser Annahme die Notwendigkeit eines umfangreichen Ausbaus der Verteilnetze.

Der Ausbaubedarf betrifft sowohl die verschiedenen Leitungsebenen (Nieder-, Mittel- und Hochspannung) als auch die Umspannebenen zwischen den Leitungsebenen. Durch die beschleunigte Transformation ist ein großer Teil des Ausbaus bereits bis Mitte der nächsten Dekade erforderlich. Da ein

Großteil der Ausbaurkosten in den niedrigen Spannungsebenen auf Aufgrabungen entfällt, sollten leitungsbezogene Ausbaumaßnahmen vorausschauend erfolgen und unmittelbar einen langfristig ausreichenden Leitungsquerschnitt vorsehen.

### **Der Systembetrieb und die Bereitstellung von Systemdienstleistungen müssen weiterentwickelt werden, um einen sicheren Betrieb des Stromnetzes zu gewährleisten.**

Der Umbau des Stromsystems auf der Erzeugungs- und Verbrauchsseite muss mit deutlichen Weiterentwicklungen des Systembetriebs sowie der Bereitstellung von Systemdienstleistungen einhergehen. Die inhärent stabilisierenden Eigenschaften konventioneller Kraftwerke müssen künftig alternativ erbracht werden. Außerdem muss der deutlich größeren Volatilität der Erzeugung und der lastseitigen Nachfrage durch weiterentwickelte Netzbetriebsprozesse und technische Anforderungen an die Anlagen Rechnung getragen werden.

Der zukünftige Bedarf an Systemdienstleistungen wird deutlich steigen. Dies ist neben den Veränderungen auf der Erzeugungs- und Lastseite insbesondere auch auf wachsende Stromtransite sowie die Höherauslastung der Stromnetze zurückzuführen. Im Dezember 2023 verabschiedete das Bundeskabinett die Roadmap Systemstabilität. Diese definiert auf prozessualer Ebene, welche Schritte für einen weiterhin stabilen Betrieb des Stromnetzes umgesetzt werden müssen, wann eine Umsetzung erfolgen muss und welche Akteure jeweils prozessverantwortlich sind. Ab 2025 kommt dem zweijährigen Systemstabilitätsbericht der Übertragungsnetzbetreiber sowie dem Monitoring der Bundesnetzagentur für den Bereich Systemstabilität ebenfalls eine zentrale Bedeutung zu.

Ein wesentliches Ergebnis der Roadmap Systemstabilität ist, dass der Durchdringung von netzbilden-

den Stromrichtern in den Übertragungs- und Verteilnetzen eine Schlüsselrolle zur Wahrung der Systemstabilität im Zielsystem zukommt. Dies betrifft Erzeuger und Speicher sowie teilweise auch Verbraucher. Aktuell fehlen noch Erfahrungen mit dem flächendeckenden Einsatz, die über Pilotversuche gesammelt werden müssen. Des Weiteren sind technische Anschlussregeln für netzbildende Stromrichter und weitere Systemeigenschaften auf europäischer und nationaler Ebene kurzfristig zu erstellen. Bis zur verbindlichen Erbringung der technischen Eigenschaften ist die Nutzung netzbildender Stromrichter über Anreizsysteme zu beschleunigen. In allen Prozessen der verschiedenen Netznutzer müssen die Potenziale der verschiedenen Anlagen zweckdienlich für einen signifikanten Beitrag zur Systemstabilität geplant und genutzt werden. So können die verschiedenen Systembedarfe in ausreichendem Maß und effizient gedeckt werden.

## **4.2 Gasnetze**

### **Mit dem Wasserstoff-Kernnetz wird eine Wasserstoff-Transportinfrastruktur aufgebaut.**

Für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist die Schaffung einer Wasserstoff-Transportinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Das zukünftige Wasserstoff-Transportnetz verbindet die Erzeugungsregionen mit den Wasserstoffverbrauchern – d. h. insbesondere mit der industriellen Nachfrageseite und Wasserstoffkraftwerken – und den Wasserstoffspeichern. Da neben der inländischen Erzeugung auch der Import von Wasserstoff eine große Rolle spielen wird, wird die Wasserstoffinfrastruktur in ein europäisches Wasserstoffnetz eingebunden. Hierfür bedarf es einer europäischen Koordination der Wasserstoffnetzplanung unter Berücksichtigung von Erzeugungs- und Nachfrage- regionen sowie Speicherpotenzialen und Import- routen bzw. -Terminals.

Ein großer Teil des Wasserstoff-Transportnetzes kann durch eine Umwidmung von Teilen des bestehenden Gasfernleitungsnetzes aufgebaut werden. Durch den bis 2045 rückläufigen Erdgasverbrauch können schrittweise Gasleitungen für den Transport von Wasserstoff umgerüstet werden. Parallel müssen dabei die noch jeweils vorhandenen Aufgaben des Erdgastransports erfüllt werden. Der Umfang des zukünftigen Wasserstoff-Transportnetzes wird deutlich kleiner ausfallen als das heutige Erdgas-Fernleitungsnetz, das eine Länge von rund 40.000 km aufweist.

Das Wasserstoff-Kernnetz bildet die erste Stufe des Aufbaus eines Wasserstoff-Transportnetzes in Deutschland. Bis zum Zieljahr 2032 sollen laut von der Bundesnetzagentur genehmigtem Kernnetze-Antrag schrittweise über 9.000 km Wasserstoffleitungen deutschlandweit in Betrieb genommen werden. Ab 2025 wird dieses Netz sukzessive durch Umwidmung von Teilen des Erdgasnetzes und den Neubau von Wasserstoffleitungen aufgebaut. Mit dem integrierten Netzentwicklungsplan Gas/Wasserstoff nach § 15 Energiewirtschaftsgesetz wird die Wasserstoffnetzplanung in der zweiten Stufe in einen Regelprozess überführt. In diesem Rahmen wird die Planung im Sinne einer szenario- und bedarfsorientierten Weiterentwicklung des Kernnetzes regelmäßig überprüft. Der Netzentwicklungsplan wird in ungeraden Jahren von den Fernleitungsnetzbetreibern erstellt und in geraden Jahren durch die Bundesnetzagentur bestätigt.

Das Wasserstoff-Transportnetz wird über die Standorte für die Elektrolyse und Wasserstoffkraftwerke zur Rückverstromung mit dem Stromnetz verknüpft sein. Dementsprechend muss die Wasserstoffnetzplanung nicht nur im Hinblick auf frei werdende Gasleitungen mit der Gasnetzplanung koordiniert sein. Genauso muss sie mit der Stromnetzplanung abgestimmt werden. Eine Abstimmung zwischen den Netzentwicklungsplänen Strom und Gas/Was-

serstoff erfolgt u. a. durch die Berücksichtigung der Systementwicklungsstrategie in beiden Szenario-rahmen. Daher tauschen sich Strom-Übertragungsnetzbetreiber und Gas- und Wasserstoff-Fernleitungsnetzbetreiber bei der Erstellung der Szenario-rahmen sowie im Rahmen der Bestätigung der Szenario-rahmen durch die Bundesnetzagentur aus.

### **Der Aufbau eines CO<sub>2</sub>-Transportnetzes muss zügig und koordiniert vorangetrieben werden.**

Die rechtzeitige Bereitstellung zuverlässiger und kosteneffizienter Transportoptionen für CO<sub>2</sub> ist eine Voraussetzung dafür, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industriestandorte auch künftig zu erhalten und gleichzeitig die Klimaziele zu erreichen. Instrumente für Planung und Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur entwickelt die Bundesregierung im Rahmen der Carbon-Management-Strategie. Die Planung einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur sollte koordiniert erfolgen und die Wechselwirkungen zwischen den Infrastrukturen für Strom, Erdgas und Wasserstoff berücksichtigen. Für die Entwicklung eines CO<sub>2</sub>-Netzes ist absehbar, dass Regionen mit einer hohen Konzentration an industriellen Punktquellen und Senken eine wichtige Rolle spielen werden. Dort wird sich die CO<sub>2</sub>-Infrastruktur frühzeitig entwickeln und könnte dann sukzessive an ein überregionales Transportnetz angeschlossen werden. In den Langfristszenarien erreicht dieses Netz eine Gesamtlänge von 5.000 bis 6.000 km. Es bleibt zu prüfen, inwiefern umgewidmete Erdgasleitungen für den CO<sub>2</sub>-Transport geeignet sind.

### **Nach 2045 verbleibt ein umfangreiches Gasfernleitungsnetz, dessen Nutzung unklar ist.**

Trotz der großen zukünftigen Bedeutung von Wasserstoff wird die Wasserstoffnachfrage deutlich geringer ausfallen als der heutige Erdgasbedarf. Das Gasfernleitungsnetz steht daher vor einer tiefgrei-



fenden Umstellung. Die Nachfrage nach Erdgas wird zukünftig stark zurückgehen. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland noch über 1.000 TWh Erdgas verbraucht. Um die Klimaziele einzuhalten, dürfen 2030 nur noch rund 750 TWh, 2040 noch rund 200 TWh und 2045 kein fossiles Erdgas mehr genutzt werden.

Neben der Umwidmung für das Wasserstofftransportnetz können weitere Teile des frei werdenden Erdgasnetzes unter Umständen für den Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Infrastruktur genutzt werden, die für die Treibhausgasneutralität des Industriesektors benötigt wird. Darüber hinaus könnten nach 2045 in geringem Umfang Bedarfe für den Transport von Methan bestehen. Zum Beispiel, um über einen beschränkten Zeitraum noch Gastransite sicherzustellen oder um einzelne Biomethan-Cluster zu verbinden. Angesichts des begrenzten, nachhaltig nutzbaren energetischen Biomassepotenzials ist jedoch zu erwarten, dass Einspeisung und Transport von Biomethan zur Verstromung und Wärmenutzung langfristig nicht über die Verbindung von Insellösungen hinausgehen werden. Selbst bei optimistischer Einschätzung wird es allenfalls in Einzelfällen zur dauerhaften Weiternutzung bestehender Gasnetze kommen.

### Die rückläufige Gasnachfrage macht viele Gasverteilnetze unwirtschaftlich.

Durch die rückläufige Gasnachfrage sinkt der Bedarf an Gasverteilnetzen, die heute neben Industrie- und Gewerbebetrieben insbesondere Gebäude mit Gas versorgen. Insgesamt weisen die Verteilnetze eine Länge von rund 500.000 km auf. Viele dieser Gasleitungen werden nach und nach unwirtschaftlich, weil immer weniger Kunden sie nutzen. Das liegt an der zukünftig abnehmenden Anzahl an Gasheizungen im Gebäudebereich, die weitgehend durch Wärmepumpen oder Wärmenetzanschlüsse ersetzt werden. Dementsprechend sinkt insbesondere nach 2030 der Umfang der erforderlichen

Gasverteilnetze stark. Die Anteile der heutigen Gasverteilnetze, die nicht für die Umstellung auf Wasserstoff, andere klimaneutrale Gase oder den CO<sub>2</sub>-Transport benötigt werden, werden stillgelegt.

Eine Umwidmung von Gasverteilnetzen bzw. Gasleitungen auf Wasserstoff kann in Einzelfällen sinnvoll sein, wenn industrielle und gewerbliche Verbraucher sowie Kraftwerke und KWK-Anlagen mit Wasserstoff versorgt werden sollen. Ein etwaiger lokaler Gas- bzw. Wasserstoffeinsatz in der Wärme erfordert aufgrund der Wechselwirkungen mit den Infrastrukturen und der Wasserstoffherzeugung eine abgestimmte Planung. Dabei müssen sowohl regionale Planung der Gasverteilnetze als auch die kommunale Wärmeplanung die Verfügbarkeit gasförmiger Energieträger im Gesamtsystem berücksichtigen. Um die Transformation der Gasverteilnetze zu gestalten, bedarf es eines neuen Ordnungsrahmens für die Gasverteilnetze und eines abgestimmten Vorgehens, um eine geordnete Transformation zu ermöglichen. Eckpunkte für einen Ordnungsrahmen werden durch das BMWK erarbeitet und parallel durch regulatorische Instrumente der Bundesnetzagentur unterstützt.

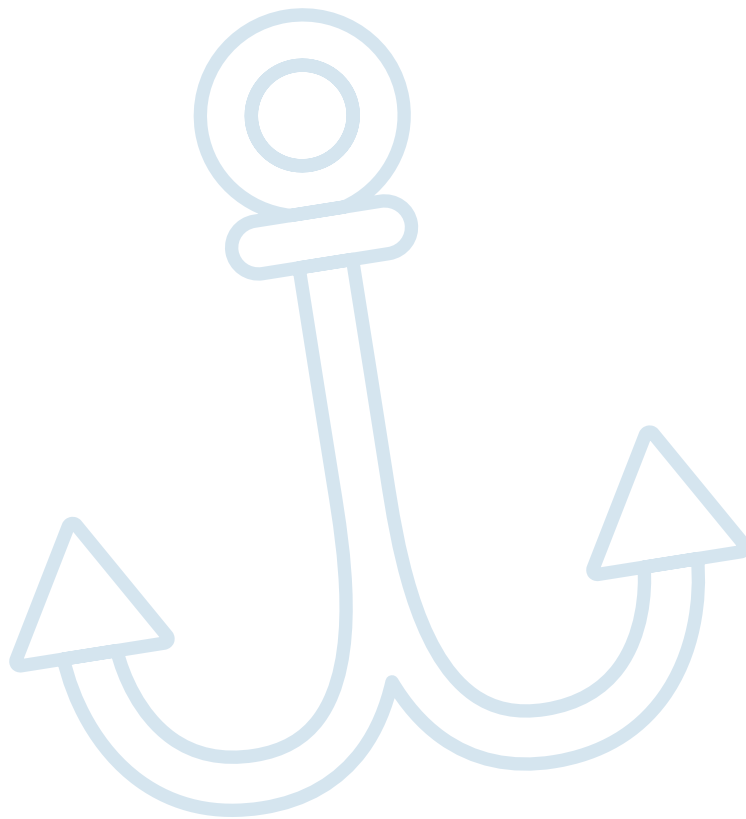
Zudem wirken sich der Ausbau und die Verdichtung von Wärmenetzen auf die Zukunft der Gasverteilnetze aus. Die Trassenlänge aller Fernwärmenetze ist allein von 2018 bis 2020 um rund 2.500 km auf gut 31.000 km gewachsen. Zukünftig werden sich sowohl die Länge als auch die Anschlussdichte der Wärmenetze weiter deutlich erhöhen, um die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung bis 2045 zu erreichen. Hinzu werden Nahwärmenetze kommen, die bei der Wärmeversorgung von Quartieren eine größere Rolle als heute übernehmen werden. Insgesamt ist auf dezentraler Ebene mit einem deutlich geringeren Umfang der Gasverteilnetze zu rechnen. Die Stromverteilnetze und Wärmenetze dagegen werden erheblich ausgebaut.

### Instrumente zur Transformation der Infrastrukturen

Eine leistungsfähige Infrastruktur bildet das Rückgrat der Energiewende. Um einen kohärenten Aus- und Aufbau zu gewährleisten, wurde die **Systementwicklungsstrategie im Energiewirtschaftsgesetz** verankert. Darüber hinaus sind im letzten Jahr zahlreiche Maßnahmen auf den Weg gebracht worden, weitere befinden sich in der Vorbereitung:

- Es wurden zahlreiche **Maßnahmen zur Beschleunigung des Stromnetzausbaus** ergriffen, unter anderem durch umfangreiche Rechtsänderungen. Zu nennen sind etwa das Energiesofortmaßnahmenpaket, das Gesetz zur Änderung des Energiesicherungsgesetzes und anderer energiewirtschaftlicher Vorschriften sowie das Gesetz zur Anpassung des Energiewirtschaftsrechts an unionsrechtliche Vorgaben und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften. Mit der Ausgestaltung der sog. EU-Notfall-Verordnung im deutschen Recht gelten befristet zusätzliche Erleichterungen für den Netzausbau. Aktuell wird an der Umsetzung der Bestimmungen aus der novellierten Erneuerbare-Energien-Richtlinie (sog. RED III) gearbeitet. Ziel ist es, diese Erleichterungen so weit wie möglich zu verstetigen. Der **Bundesbedarfsplan** wurde für den Ausbau der Übertragungsnetze aktualisiert. Darin wurden auch neue Projekte aufgenommen, sodass der Netzausbau mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien Schritt hält. Überdies wurde ein neuer Netzentwicklungsplan (NEP) Strom erarbeitet, der erstmals auf das **Klimaneutralitätsnetz** bis 2045 ausgerichtet ist. Der **Bund-Länder-Beschleunigungspakt** soll Planungs- und Genehmigungsverfahren weiter verbessern und unter anderem die personelle Ausstattung von Behörden und Gerichten stärken. Zur Begleitung der Umsetzung des angepassten Rechtsrahmens der Stromverteilnetzplanung haben wir den **Branchendialog Verteilnetze der Zukunft** initiiert. Die **Roadmap Systemstabilität** haben wir gemeinsam mit Netz- und Anlagenbetreibern, Verbrauchern, technischen Normungsgremien und der Wissenschaft erarbeitet und vorgelegt. Sie zeigt auf, welche Prozesse und Funktionalitäten für einen sicheren und robusten Systembetrieb in einem Stromsystem benötigt werden, das auf erneuerbaren Energien basiert.
- Mit dem **Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze** haben wir die kommunale Wärmeplanung flächendeckend eingeführt. Die Wärmeplanung ist auf lokaler Ebene das zentrale Instrument für die koordinierte Entwicklung der Energieinfrastrukturen.
- Mit dem **Wasserstoff-Kernnetz** haben wir ein zentrales Infrastrukturprojekt der Energiewende auf den Weg gebracht. Verbrauchs- und Erzeugungsschwerpunkte von Wasserstoff sowie Speicher und Importpunkte werden so bis zum Zieljahr 2032 schrittweise miteinander verbunden. Eine zeitlich befristete Flexibilisierungsoption für Kernnetz-Maßnahmen erlaubt einen am Bedarf orientierten Aufbau des Kernnetzes. Ferner fördern wir im Rahmen der **Important Projects of Common European Interest (IPCEI)** bereits Pipelineprojekte mit rund 2.070 km Leitungslänge (ca. 1.000 km Neubau und 1.070 km Umnutzung von Erdgasleitungen). Damit die Wasserstoffinfrastruktur möglichst schnell realisiert wird, wurde ein **Wasserstoffbeschleunigungsgesetz** erarbeitet und dem Bundestag vorgelegt. Es soll den beschleunigten Auf- und Ausbau der Infrastruktur für Erzeugung, für Speicherung und Import von Wasserstoff ermöglichen. Mit dem Green Paper zur **Transformation Gas-/Wasserstoff-Verteilernetze** zeigen wir mögliche Handlungsfelder auf, die im Rahmen des Transformationsprozesses bis zum Jahr 2045 zu adressieren sind. Mit dem Beteiligungsprozess legen wir den Grundstein für einen späteren Gesetzgebungsprozess.
- Mit der **Carbon-Management-Strategie** schaffen wir einen Rahmen für den Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Transport- und Speicherinfrastruktur in Deutschland, insbesondere in Bezug auf schwer bzw. nicht vermeidbare Emissionen.

## 5. Ankerpunkte



Die Festlegungen der Systementwicklungsstrategie (SES) sind laut § 12a und § 15b Energiewirtschaftsgesetz in den Szenariorahmen der Netzentwicklungspläne (NEP) Strom und Gas/Wasserstoff angemessen zu berücksichtigen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass die Planungen der Stromübertragungs- und Gastransportnetze sektorenübergreifend kohärent erfolgen.

Die SES bietet darüber hinaus Orientierung für sektor- und energieträgerspezifische Strategien wie die Nationale Wasserstoffstrategie und dezentrale Planungsprozesse wie die kommunale Wärmeplanung oder die Netzausbauplanung der Stromverteilnetze. Sie trägt so zur Kohärenz der verschiedenen Strategien, Programme und Planungsprozesse im Sinne eines effizienten und klimaneutralen Energiesystems bei. Umgekehrt werden Erkenntnisse aus nachgelagerten Strategien und Prozessen in der SES berücksichtigt.

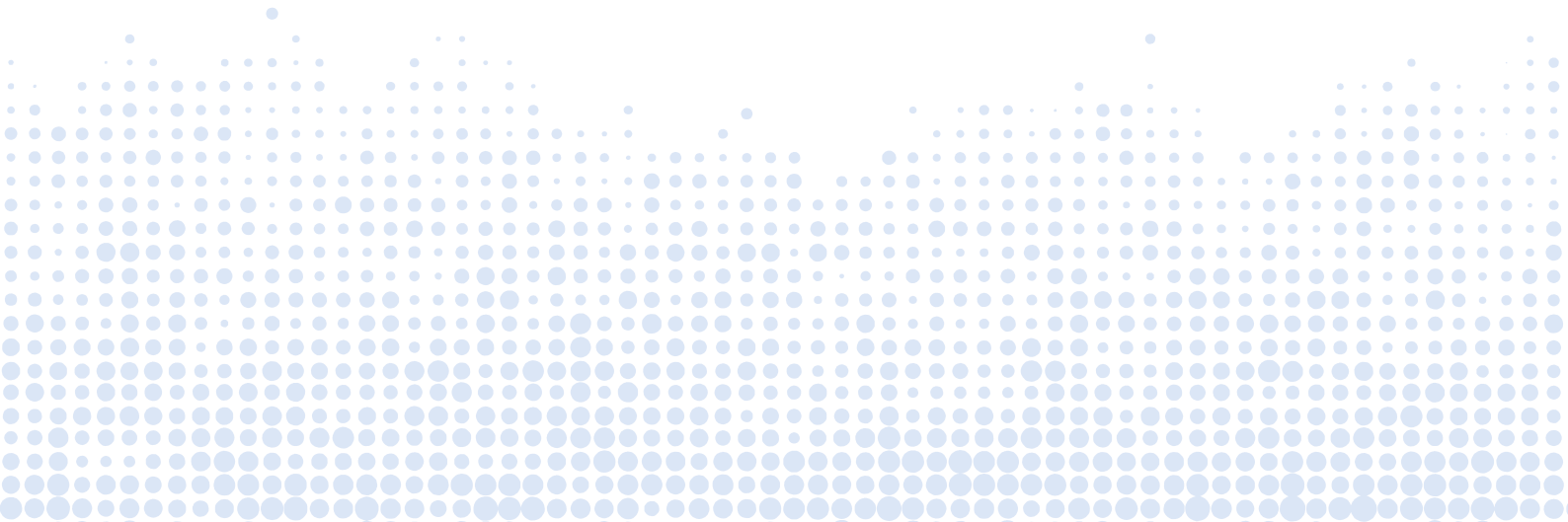
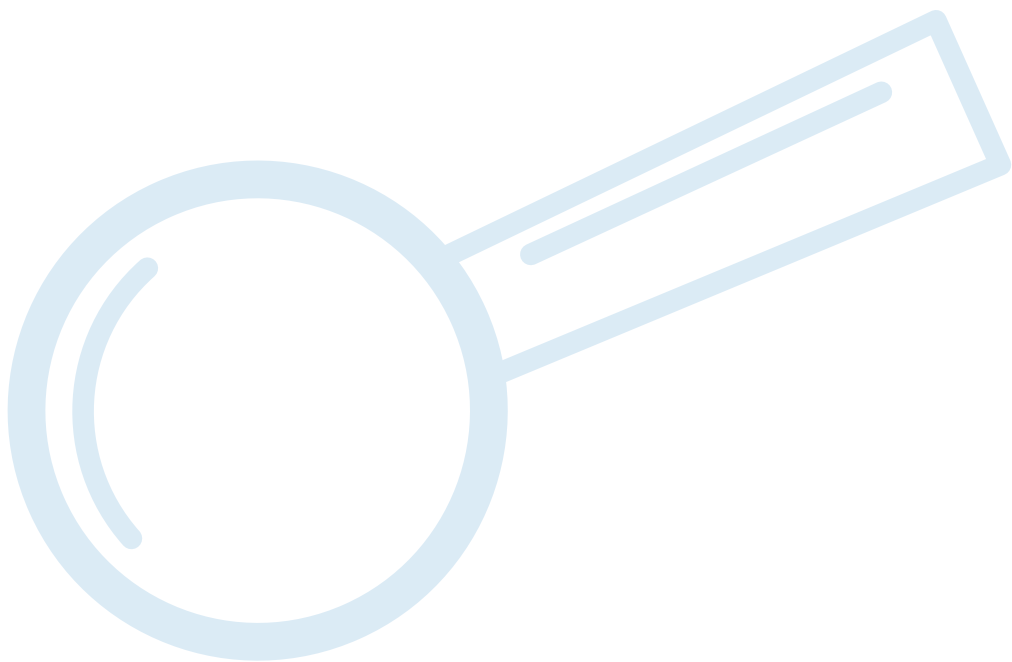
Die folgenden Ankerpunkte fassen wesentliche Festlegungen der Systementwicklungsstrategie zusammen. Im Sinne einer resilienten Planung können die Ankerpunkte von den in vorherigen Kapiteln genannten Szenario-Bandbreiten abweichen. Um eine aus gesamtsystemischer Sicht kohärente und robuste Planung der Energieinfrastrukturen zu gewährleisten, sollen die Ankerpunkte in den Szenariorahmen der Netzbetreiber berücksichtigt werden. Gleichzeitig soll angesichts bestehender Unsicherheiten die Flexibilität für sektorspezifische Gegebenheiten gewahrt werden. Die Ankerpunkte sind daher nicht als bindende Vorgabe zu verstehen. Allerdings sollen die Szenariorahmen die Erreichung der Ankerpunkte ermöglichen, um gesamtsystemisch sinnvolle Entwicklungspfade offenzuhalten. Signifikante Abweichungen sollen zwischen den Netzbetreibern koordiniert erfolgen und begründet werden, um Rückschlüsse für weitere Analysen im Rahmen der SES (siehe Kapitel 6) zu ermöglichen.

	2035	2045	Hinweise
<b>ENERGIENACHFRAGE</b>			
<b>Bruttostromverbrauch</b>	Über 950 TWh	1.100 – 1.300 TWh	Unsicherheiten bei der Erreichung der Effizienzziele sollten insbesondere bei der Stromnetzplanung berücksichtigt werden.
– Davon Industrie	250 – 320 TWh	300 – 400 TWh	Die Planung der Energieinfrastrukturen muss es ermöglichen, dass der Industriestandort Deutschland erhalten und treibhausgasneutral umgebaut werden kann.
Anzahl Wärmepumpen	8 – 12 Mio.	15 – 18 Mio.	
Anzahl E-Pkw	22 – 24 Mio.	Fast komplette Flotte	
Anzahl elektrische leichte und mittlere Nutzfahrzeuge	Über 3 Mio.	Fast komplette Flotte	
Anzahl schwere E-Lkw	Über 250.000	420.000 – 500.000	

	2035	2045	Hinweise
<b>Wasserstoffnachfrage</b>		360 – 500 TWh	
Industrie		300 – 400 TWh	
– Stahlproduktion	Rund 50 TWh	Bis zu 80 TWh	Annahme: bis 2045 vollständige Umstellung der Primärstahlproduktion (23 Mio. t) auf H <sub>2</sub> -Direktreduktion. Angabe inkludiert Bedarfe für Prozesswärme.
– High Value Chemicals		Bis zu 150 TWh	Bedarf für die stoffliche Nutzung. Die Wasserstoffnetzplanung sollte die MtO- und MtA-Routen, inklusive der inländischen Methanol-Produktion, ermöglichen.
Dezentrale Gebäudewärme	Kein umfangreicher und großflächiger Einsatz		Wird auf Grundlage der kommunalen Wärmepläne und der Umstellungspläne für Gasverteilnetze nach §71k GEG überprüft.
Schwerlast, Busse, Schiene		Deutlich unter 40 TWh	
Kraftwerke	Mind. 20 TWh	60 – 120 TWh	
<b>Wasserstoffderivate</b>		Rund 200 TWh	Bedarf wird überwiegend aus Importen gedeckt. Ein Großteil des Bedarfs entsteht im Verkehrssektor.
<b>Wärmenetzanschlüsse</b>		4 – 5 Mio.	Die Energienachfrage aus Wärmenetzen wird überwiegend durch Großwärmepumpen gedeckt. Insbesondere in KWK-Anlagen kann auch Wasserstoff zum Einsatz kommen. Geothermie, Solarthermie, Elektrokessel und Abfall-KWK ergänzen die Wärmeerzeugung.
<b>ENERGIEANGEBOT</b>			
<b>Erneuerbare Energien</b>			
Wind an Land	157 GW	Mind. 160 GW	
Wind auf See	50 GW	Mind. 70 GW	Unter Berücksichtigung des vorgesehenen Ausbaupfades für Wind auf See wird das Ausbauziel von 70 GW voraussichtlich bereits im Jahr 2040 erreicht.
Photovoltaik	309 GW	Mind. 400 GW	
<b>Elektrolyseure</b>	30 – 40 GW <sub>el</sub>	60 – 80 GW <sub>el</sub>	Elektrolyseure sollten insbesondere im Norden, in der Nähe der erneuerbaren Stromerzeugung, entstehen. Gleichzeitig ist auch ein Aufwuchs von Elektrolyseleistung bei energieintensiven Industrieclustern im Süden zu erwarten.
<b>Importquote Wasserstoff</b>		50 – 70 Prozent	Der Wasserstoffimport erfolgt voraussichtlich überwiegend per Pipeline aus dem europäischen Ausland. Die Netzplanung sollte eine Diversifizierung der Importrouten ermöglichen, um einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden.
<b>Interkonnektoren Strom</b>		80 – 90 GW	Der Bedarf und Nutzen zusätzlicher Interkonnektoren sollte in der Netzplanung geprüft werden, wobei die Auswirkungen auf Netzengpässe und die Stabilität des Stromsystems bei der Dimensionierung berücksichtigt werden müssen.

	2035	2045	Hinweise
<b>Steuerbare Kraftwerke</b>			
(ohne Biomasse und Wasserkraft)	50 – 60 GW	60 – 80 GW	Die Allokation neuer steuerbarer Kraftwerke sollte kurz- bis mittelfristig insbesondere im Süden erfolgen, um Redispatchkapazitäten und Systemdienstleistungen bereitstellen zu können. Langfristig können Kraftwerke auch in der Nähe von Wasserstoffspeichern entstehen, sofern ausreichende Kapazitäten zur Behebung von Engpässen im Süden zur Verfügung stehen. Die Allokation von Kraftwerken mit Wärmeauskopplung hängt u. a. von der lokalen Wärmenachfrage sowie der Verfügbarkeit einer Wasserstoffinfrastruktur ab.
<b>Wasserstoffspeicher</b>	Mind. 15 TWh	80 – 100 TWh	Angegeben ist das Arbeitsgasvolumen. Geringere Fortschritte u. a. bei der Energieeffizienz können den Speicherbedarf erhöhen. Ein entsprechender Resilienzpuffer sollte in der Planung berücksichtigt werden. Das Wasserstoffnetz sollte es ermöglichen, dass Speicher in Deutschland auch von anderen Ländern in Europa teilweise genutzt werden können.
<b>Lastseitige Flexibilität</b>		Vornehmlich marktorientiert	Auch der netzorientierte Einsatz lastseitiger Flexibilität kann relevanten Nutzen haben. Die Annahmen zu Umfang und Einsatzweise lastseitiger Flexibilitäten sollten zwischen den Regionalszenarien der Verteilnetzbetreiber und dem Szenariorahmen der Übertragungsnetzbetreiber abgeglichen werden.
<b>Stationäre Batteriespeicher</b>	Mind. 35 GW	Mind. 50 GW	Der künftige Bedarf ist insbesondere von der Kostenentwicklung und der Verfügbarkeit anderer Flexibilitäten abhängig.

## 6. Weiterer Analysebedarf





Angesichts der bestehenden Unsicherheiten, des langen Zeithorizonts bis 2045 und der Komplexität des Energiesystems ist die SES als lernender Prozess angelegt. Zum Abschluss einer jeden SES werden daher Themen identifiziert, die in der nachfolgenden SES eingehender untersucht werden sollen. Grundlage für den untenstehenden weiteren Analysebedarf sind unter anderem die Konsultationsbeiträge des Zwischenberichts und Rückmeldungen aus dem SES-Plenum. Zusätzlich werden aktuelle Entwicklungen kontinuierlich beobachtet und aufgegriffen. Die nachfolgende Liste ist daher nicht abschließend und wird fortlaufend ergänzt:

#### Übergreifende Themen

- Systemkosten
- Verzahnung der SES mit dezentralen Planungsprozessen
- Carbon Management und Negativemissionen
- Auswirkung des Klimawandels auf die Energieversorgung

#### Energieangebot

- Entwicklungen im Ausland (u. a. Ausbau der erneuerbaren Energien, Ausbau der Energieinfrastrukturen, Importrouten für Wasserstoff und Wasserstoffderivate, Wasserstoffspeicher)
- Ausbau und Repowering der erneuerbaren Energien und deren regionale Verortung im Inland
- Regionale Verortung von Elektrolyseuren und Wasserstoff-Kraftwerken im Inland
- Nachhaltig nutzbare Biomethanpotenziale
- Wärmebereitstellung in Wärmenetzen

#### Energienachfrage

- Hochlauf E-Mobilität
- Hochlauf Wärmepumpen und klimaneutrale Wärmebereitstellung
- Investitionsentscheidungen der Industrie (inkl. der Raffinerien)

- Technologische Entwicklungen
- Effizienzziele und Kreislaufwirtschaft
- Neue Rechenzentren (Auswirkung auf Abwärmepotenziale)

#### Infrastrukturen und Systembetrieb

- Entwicklung der Speicher (Wasserstoffspeicher, Wärmespeicher, Batteriespeicher) und Auswirkungen auf das Gesamtsystem
- Entwicklung der Strom-, Wasserstoff- und Methanetze; sowohl auf Transport- als auch Verteilnetzebene
- Interkonnektoren und Grenzübergangspunkte
- Erschließung und Einsatz nachfrageseitiger Flexibilität (inkl. der Industrie)
- Auswirkungen regulatorischer Anpassungen (z. B. lokale Preissignale)
- Maßnahmen zur Sicherung der Systemstabilität und damit einhergehende Kosten

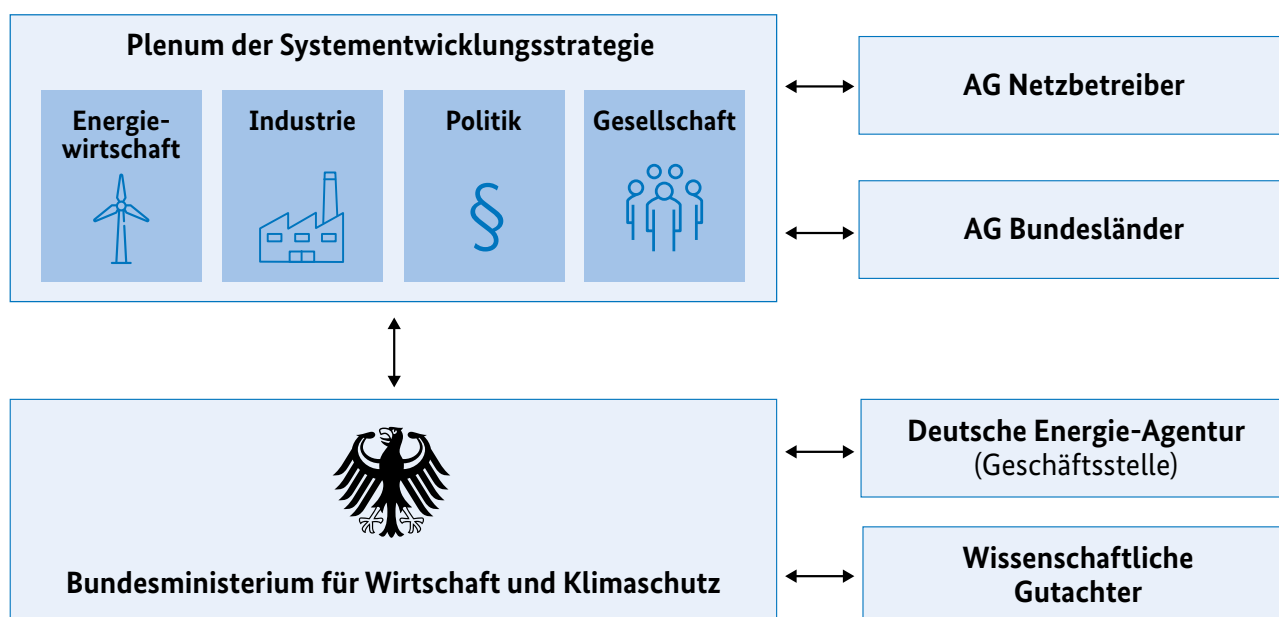
# Anhang: Prozess der Systementwicklungsstrategie

Die SES ist als lernender, partizipativer und regelmäßig wiederkehrender Prozess angelegt. Sie wurde in der vorliegenden Fassung erstmalig durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter Einbindung der Öffentlichkeit erstellt und soll laut Energiewirtschaftsgesetz ab 2027 alle vier Jahre von der Bundesregierung dem Deutschen Bundestag vorgelegt werden. Zentrales Gremium der SES ist das Plenum mit Vertreterinnen und Vertretern der Energiewirtschaft, Industrie, Zivilgesellschaft, Bundeskanzleramt, Bundesnetzagentur sowie der Fachressorts auf Bundesebene und in den Bundesländern (Abbildung 18). Das Plenum berät bei der Ausarbeitung der SES und definiert wesentliche Fragestellungen. Die Gutachter des Langfristszenarien-Konsortiums unterstützen die Beratungen mit wissenschaftlichen Analysen. Die Deutsche Energie-Agentur organisiert als Geschäftsstelle den Beteiligungsprozess.

Die Akteure des Plenums wurden so ausgewählt, dass die durch die Fragestellungen der SES betroffenen Anspruchsgruppen vertreten sind. Dabei wurden hauptsächlich Dachverbände eingebunden, um die Arbeitsfähigkeit des Plenums zu gewährleisten. Zwei Arbeitsgruppen, die AG-Netzbetreiber sowie die AG-Bundesländer, unterstützen die Arbeit des Plenums. Alle Akteure sind unten gelistet.

Zentrale wissenschaftliche Grundlage der SES sind die im Auftrag des BMWK erstellten Langfristszenarien ([www.langfristszenarien.de](http://www.langfristszenarien.de)). Diese wurden durch ein Forschungskonsortium bestehend aus Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Consentec, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg und Technische Universität Berlin durchgeführt. In den Langfristszenarien wird untersucht, wie das Energiesystem bis

Abbildung 18: Stakeholderprozess der Systementwicklungsstrategie



2045 klimaneutral werden kann. Die Modellierung ist komplex: Sie umfasst eine volkswirtschaftliche Optimierung des gesamten Energiesystems, also die Erzeugung von Strom, Wärme und Wasserstoff sowie die Nachfrage nach Energie in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Geräte und bildet auch das europäische Ausland ab. Ebenso werden die Infrastrukturen für Strom und Gas (Erdgas und Wasserstoff) modelliert. Im Fokus der Analyse steht dabei die Untersuchung von unterschiedlichen Szenarien, um so Erkenntnisse über die volkswirtschaftlichen Vor- und Nachteile alternativer Pfade für die Transformation des Energiesystems zu gewinnen. Instrumente wie Investitionsanreize, Marktdesign und betriebswirtschaftliche Überlegungen stehen nicht im Fokus der Analyse.

Der Prozess der ersten SES gliederte sich in zwei Phasen. Zunächst wurden ab Herbst 2022 die Langfristszenarien in Webinaren öffentlich vorgestellt und die Schlussfolgerungen daraus im Plenum und mit den Bundesländern diskutiert. Auf dieser Grundlage wurde ein [Zwischenbericht](#) der Systementwicklungsstrategie durch das BMWK erarbeitet und veröffentlicht. Im Rahmen einer [schriftlichen Konsultation](#) des Zwischenberichts beteiligten sich 37 Verbände und Unternehmen. Ein [Auswertungsdokument](#) gibt einen Überblick über die inhaltlichen Schwerpunkte der Konsultationsbeiträge und stellt zentrale Positionen dar.

Anschließend wurden basierend auf den identifizierten Fragestellungen zusätzliche Szenarien durch das Langfristszenarien-Konsortium berechnet. In zwei Workshops des Plenums wurden die Annahmen zur Ausgestaltung ausgewählter Szenarien diskutiert. Die neuen Langfristszenarien wurden nach Abschluss in Webinaren vorgestellt und die Schlussfolgerungen daraus im Plenum diskutiert. Parallel wurden im Rahmen der AG Netzbetreiber vorläufige Ankerpunkte entwickelt, um

deren Berücksichtigung in den Entwürfen der Szenariorahmen für die Netzentwicklungspläne 2025 zu ermöglichen. Zusätzlich wurden weitere Analysebedarfe für zukünftige Iterationen der SES identifiziert. Gemeinsam mit der Auswertung der Konsultation des Zwischenberichts sind die so gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage der vorliegenden Systementwicklungsstrategie.

Künftige Iterationen der SES sollen stärker mit den Prozessen der Netzentwicklungsplanung synchronisiert werden, um den Auftrag aus dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) zu erfüllen. Laut § 12a und § 15b EnWG haben die Szenariorahmen die Festlegungen der SES angemessen zu berücksichtigen. Die Szenariorahmen sind in den geraden Jahren zu erstellen. Um eine Berücksichtigung der SES zu gewährleisten, soll diese künftig in ungeraden Jahren aktualisiert und vorgelegt werden.

Teilnehmende der AG Bundesländer sind Vertreterinnen und Vertreter der Fachressorts aus den 16 Bundesländern. Teilnehmende des Plenums und der AG Netzbetreiber (eine Untermenge des Plenums, mit \* gekennzeichnet) sind:

#### Netzbetreiber

- 50Hertz Transmission\*
- Amprion\*
- Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas\*
- bayernets\*
- E.ON
- EWE Netz
- Gasunie Deutschland Transport Services\*
- Netze BW
- Open Grid Europe\*
- Stromnetz Hamburg
- TenneT TSO\*
- TransnetBW\*

### Energiewirtschaft

- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
- Bundesverband Erneuerbare Energien
- Bundesverband Neue Energiewirtschaft
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
- Verband kommunaler Unternehmen

### Industrie

- Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie
- Bundesverband der Deutschen Industrie
- Deutsche Industrie- und Handelskammer
- Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz
- Verband der Automobilindustrie
- Verband der Chemischen Industrie
- Wirtschaftsvereinigung Stahl
- Zentraler Immobilien Ausschuss

### Gesellschaft

- Agora Energiewende
- Agora Verkehrswende
- Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
- Deutscher Gewerkschaftsbund
- Germanwatch, in Vertretung für Deutscher Naturschutzring, Dachverband der deutschen Natur-, Tier- und Umweltschutzorganisationen
- Deutsche Umwelthilfe
- Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie
- Verbraucherzentrale Bundesverband

### Politik und Verwaltung

- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
- Bundeskanzleramt
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen
- Bundesnetzagentur\*
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- Ministerium für Wissenschaft, Energie, Klimaschutz und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt
- Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz
- Städtetag

### Der Prozess wurde durch Gutachterinnen und Gutachter folgender Einrichtungen wissenschaftlich unterstützt:

- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
- Consentec
- Technische Universität Berlin
- Büro für Energiewirtschaft und technische Planung
- Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie
- Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität

