



Zwischenbericht der Systementwicklungs- strategie



Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Öffentlichkeitsarbeit
11019 Berlin
www.bmwk.de

Stand

November 2023

Diese Publikation wird ausschließlich als Download angeboten.

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

Gestaltung

PRpetuum GmbH, 80801 München

Zentraler Bestellservice für Publikationen der Bundesregierung:

E-Mail: 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. Ausgangslage.....	6
2. Sektorübergreifende Eckpunkte.....	14
3. Energienachfrage.....	19
3.1 Industrie.....	20
3.2 Gebäude.....	26
3.3 Verkehr.....	31
4. Energieangebot.....	34
4.1 Stromerzeugung.....	36
4.2 Wärmebereitstellung in Wärmenetzen.....	39
4.3 Wasserstoff und Wasserstoffderivate.....	39
4.4 Energieimporte und Energiehandel.....	42
4.5 Flexibilität durch Sektorkopplung und Speicher.....	44
5. Infrastrukturen.....	50
5.1 Stromnetze.....	51
5.2 Gas- und Wasserstoffnetze.....	53
6. Fazit.....	57

Zusammenfassung

Deutschland hat sich im Pariser Klimaabkommen weltweit zusammen mit anderen Ländern dazu verpflichtet, einen angemessenen Beitrag zum internationalen Klimaschutz zu leisten, um die Erderwärmung zu begrenzen. Diese Verpflichtung hat Europa durch gemeinsame Ziele bekräftigt. Deutschlands Weg zur Klimaneutralität bis 2045 ist im **Bundes-Klimaschutzgesetz** vorgezeichnet. Die darin gesetzlich verankerten Klimaschutzziele wurden nach einem Urteil des Bundesverfassungsgerichts noch unter der Vorgängerregierung im Sommer 2021 verschärft und das novellierte Bundes-Klimaschutzgesetz ist am 31. August 2021 in Kraft getreten.

Die dafür notwendige Transformation unserer Wirtschaft und Industrie hin zu einer CO₂-neutralen Produktion ist insbesondere für Deutschland als exportorientierte Industrienation eine zentrale Herausforderung unserer Zeit. Sie ist untrennbar verbunden mit der klimaneutralen Sicherung und Erneuerung unseres Wohlstands, unseres gesellschaftlichen Zusammenhalts, jetzt und in Zukunft. Sie ist Kern unseres Versprechens, auch für die nächsten Generationen die Basis für Freiheit, Gerechtigkeit und nachhaltigen Wohlstand zu garantieren.

Unseren Wohlstand in der Globalisierung zu sichern ist nur möglich, wenn wir wirtschaftlich und technologisch weiter in der Spitzenliga spielen und die Innovationskräfte unserer Wirtschaft entfalten. Um die notwendige Transformation unserer Wirtschaft voranzutreiben, ist es daher wichtig, wo immer möglich und sinnvoll **marktwirtschaftliche, technologieoffene Wege** einzuschlagen. Dabei ist der hohen Dringlichkeit und dem engen zeitlichen Rahmen Rechnung zu tragen. Das Ziel Treibhausgasneutralität 2045 und die im Bundes-Klimaschutzgesetz verankerten Zwischenziele erfordern eine **hohe Transformationsgeschwindigkeit** in allen Sektoren. Angesichts der begrenzten verbleibenden Zeit, langen Investitionszyklen, notwendigen Planungs- und Realisierungszeiten und vor dem Hintergrund,

dass diverse Technologien (z. B. Wasserstoff) noch hochskaliert werden müssen, müssen aus technisch-systemischer Sicht auf dem Weg zur Klimaneutralität heute **Technologieentscheidungen insbesondere mit Blick auf erforderliche Infrastrukturen** getroffen werden.

Vor diesem Hintergrund braucht die Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem bis 2045 insbesondere im Hinblick auf die Infrastrukturplanungen eine übergreifende Strategie. Mit der **Systementwicklungsstrategie** entwickelt das BMWK eine robuste, sektorübergreifende Strategie für die Transformation des Energiesystems. Die Systementwicklungsstrategie wird vom BMWK in einem partizipativen Prozess erstellt, in den Vertreterinnen und Vertreter der Energiewirtschaft, Industrie, Zivilgesellschaft und Politik eingebunden sind. Wissenschaftlich basiert die Systementwicklungsstrategie auf den Langfristszenarien des BMWK.

Der vorliegende **Zwischenbericht zur Systementwicklungsstrategie** bündelt aus technisch-systemischer Sicht Erkenntnisse aus Szenarien und skizziert **robuste Transformationspfade**, wie die Klimaziele effizient erreicht werden können, ohne die notwendige **Flexibilität** zu verlieren, auf Änderungen der Umweltbedingungen reagieren zu können. Berücksichtigt wird dabei immer, wie die weiteren energiewirtschaftlichen Ziele wie Versorgungssicherheit und Kosteneffizienz erreicht werden können.

Die Energiekrise infolge des Angriffs Russlands auf die Ukraine hat verdeutlicht, dass Energiepolitik auch Sicherheitspolitik ist. Die Gewährleistung einer **sicheren und bezahlbaren Energieversorgung** mit einer ausreichenden Verfügbarkeit aller benötigten Energiequellen und sicheren Infrastrukturen ist von zentraler Bedeutung. Flexibilität, Diversifizierung, Resilienz und Redundanz ermöglichen effektive Reaktionen auf drohende Engpässe. Ein umfassendes Monitoring und Risikoanalysen – auf nationaler

und EU-Ebene – helfen, auch neue Gefährdungen in den Blick zu nehmen und rechtzeitig Anpassungsstrategien zu erarbeiten. Dies unterstützt die Transformation und schützt unsere Wirtschaft und Gesellschaft vor Rückschlägen und neuen Krisen.

Der Zwischenbericht der Systementwicklungsstrategie berücksichtigt, dass im Zeitraum bis 2045 zwangsläufig diverse „**Unbekannte**“ bestehen. Beispielsweise wird es im Zeitverlauf technologische Entwicklungen und **Innovationen** geben, deren Wirkungen noch nicht konkret abzuschätzen sind. Weitere Forschung im Bereich der Energiewende reizt die Entwicklung solcher Innovationen an, wodurch die Klimaziele schneller und kostengünstiger erreicht werden können.

Im Hinblick auf die verschiedenen Bereiche des Energiesystems lassen sich folgende zentrale Erkenntnisse festhalten:



1. Die Transformation der **Industrie** ist mit tiefgreifenden Umstellungen von Produktionsprozessen in der energieintensiven Industrie verbunden. Prozesswärme kann überwiegend elektrifiziert werden. Wasserstoff wird nach heutigem Stand insbesondere für die Chemie- und Stahlindustrie benötigt. Anderweitig nicht oder nur schwer vermeidbare prozessbedingte Emissionen, z. B. der Kalk- und Zementindustrie, müssen abgeschieden und gespeichert oder als Rohstoff genutzt werden, z. B. in der Chemieindustrie.



2. Im **Gebäudesektor** sind für die Emissionsreduktion Energieeffizienz, insbesondere energetische Sanierungen, sowie Wärmepumpen und der Aus- und Umbau von Wärmenetzen essenziell. Hinzu kommen Biomasse und perspektivisch möglicherweise Wasserstoff oder synthetische Brennstoffe (z. B. synthetisches Methan). Allerdings dürften Wasserstoff und synthetische Energieträger im Gebäudesektor angesichts ihrer begrenzten Verfügbarkeit und hoher Kosten zumindest bis 2030 und voraussichtlich auch langfristig allenfalls eine begrenzte Rolle spielen.



3. Im landgebundenen **Verkehr** setzen sich strombasierte Antriebe weitgehend durch. Synthetische Flüssigkraftstoffe werden insbesondere im Luft- und Seeverkehr benötigt.



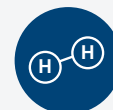
4. **Energieeffizienz** über alle Sektoren hinweg ist eine wesentliche Säule für eine erfolgreiche Transformation des Energiesystems. Energieeffizienz reduziert den Energiebedarf und begrenzt damit zukünftig den ohnehin hohen Bedarf an erneuerbaren Energien. Gleichwohl stellt die Transformation der Nachfragesektoren **hohe Anforderungen an das Energieangebot** zur Bereitstellung CO₂-neutraler Energieträger in Form von Strom sowie Wasserstoff und Wasserstoffderivaten. Der Strombedarf wird sich langfristig im Vergleich zu heute wahrscheinlich mehr als verdoppeln und erreicht 2045 eine Größenordnung von 1.100 bis 1.300 TWh. Ebenso steigt der Bedarf an Wasserstoff stark an und erreicht 2045 voraussichtlich eine Größenordnung von 360 bis 500 TWh; hinzu kommt eine Nachfrage nach synthetischen Kohlenwasserstoffen von rund 200 TWh.



5. Für die **Stromerzeugung** müssen Wind und Photovoltaik, die die Säulen der zukünftigen Energieversorgung bilden, sehr schnell weiter ausgebaut werden. Zukünftig sind es Wasserstoffkraftwerke, die Strom in Zeiten mit wenig Wind oder Sonne erzeugen und das Stromsystem absichern. Für die Versorgung dieser Kraftwerke mit Wasserstoff ist neben dem Aufbau einer Wasserstoffstoffinfrastruktur die Erschließung von Wasserstoffspeichern zentral.



6. Die Bereitstellung von **Wärme aus Wärmenetzen** muss zügig und kontinuierlich auf die Nutzung von Abwärme sowie von erneuerbaren Energien, insbesondere Großwärmepumpen, Geothermie und Solarthermie, umgestellt werden. Der Anteil leitungsgebundener Wärme wird deutlich ansteigen. Dazu sind die Wärmenetze auszubauen, zu verdichten und auf die effiziente Einbindung neuer, klimaneutraler Wärmequellen sowie Wärmespeicher auszurichten.



7. Ebenso sollte das Angebot von grünem **Wasserstoff** und Wasserstoffderivaten schnellstmöglich ausgebaut werden. Bis zur ausreichenden Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff kann in der Übergangsphase zudem blauer Wasserstoff zur Emissionsreduktion beitragen. Die inländische Erzeugung von grünem Wasserstoff sollte möglichst systemdienlich in der Nähe der erneuerbaren Stromerzeugungspotenziale erfolgen. Angesichts des erheblichen Wasserstoffbedarfs wird Deutschland trotz einer umfangreichen inländischen Erzeugung rund 50 bis 70 Prozent seines Wasserstoffbedarfs importieren. Für den pipelinegebundenen Import ist der Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft erforderlich. Wasserstoffderivate werden angesichts ihrer geringen Transportkosten vor allem außerhalb Europas erzeugt und importiert. Um zukünftig einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden, sollten Lieferländer und Transportstrukturen diversifiziert werden.



8. **Energiehandel**, der unter anderem einen entsprechenden Ausbau der Energieinfrastrukturen erfordert, sowie neue **flexible Stromverbraucher** gleichen zeitliche Ungleichgewichte zwischen Erzeugung und Verbrauch aus. Elektrolyseure, Wärmepumpen und Elektroautos – verbunden mit verbraucherfreundlichen und sicheren Angeboten für ein digitales Nachfragemanagement – bieten große, kurzfristige Flexibilitätspotenziale. Ebenso erleichtern Großwärmepumpen, die zukünftig eine zentrale Technologie in Wärmenetzen sind, in Verbindung mit Wärmespeichern die Integration der erneuerbaren Energien. Wasserstoffspeicher gleichen saisonale Schwankungen auf der Angebots- und Nachfrageseite aus.



9. Bei den **Stromnetzen** müssen sowohl die Übertragungsnetze als auch die Verteilnetze zügig stark ausgebaut werden. Das Stromübertragungsnetz verbindet die Erzeugungs- mit den Nachfrageregionen und ermöglicht den großräumigen Ausgleich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Die Stromverteilnetze müssen für den Anschluss von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen sowie neuer Stromverbraucher wie Elektromobilität und Wärmepumpen flächendeckend stark ausgebaut werden. Für den Betrieb der Stromnetze bedarf es aufgrund der dynamischen Transformation und der besonderen Bedeutung für die Systemsicherheit eines robusten und fehlertoleranten Systems. Dies betrifft insbesondere auch die Bereiche Systemstabilität und Krisenvorsorge.



10. Für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist der Aufbau einer **Wasserstoffinfrastruktur** zentral. Angesichts der rückläufigen Erdgasnachfrage und vorhandener Parallelstrukturen kann der überwiegende Teil des Wasserstoffnetzes durch eine Umwidmung von Teilen des bestehenden Gasfernleitungsnetzes aufgebaut werden. Die rückläufige Gasnachfrage macht zudem viele Gasverteilstetze unwirtschaftlich und dürfte zu zahlreichen Stilllegungen von Gasverteilstetzen führen. Es bedarf deswegen eines neuen Ordnungsrahmens für die Regulierung und Finanzierung der Gasverteilstetze, die Verbrauchern und Kommunen eine verlässliche Übergangsplanung ermöglicht.



11. Die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen des Energiesystems erfordern eine **sektorübergreifende Koordination**. Insbesondere im Hinblick auf die Energieinfrastrukturen ist eine stärker integrierte Planung erforderlich, die mit dem Prozess der **Systementwicklungsstrategie** etabliert werden soll.

1. Ausgangslage

Klimaschutz und Energiewende sind zentrale Prioritäten der 20. Legislaturperiode.

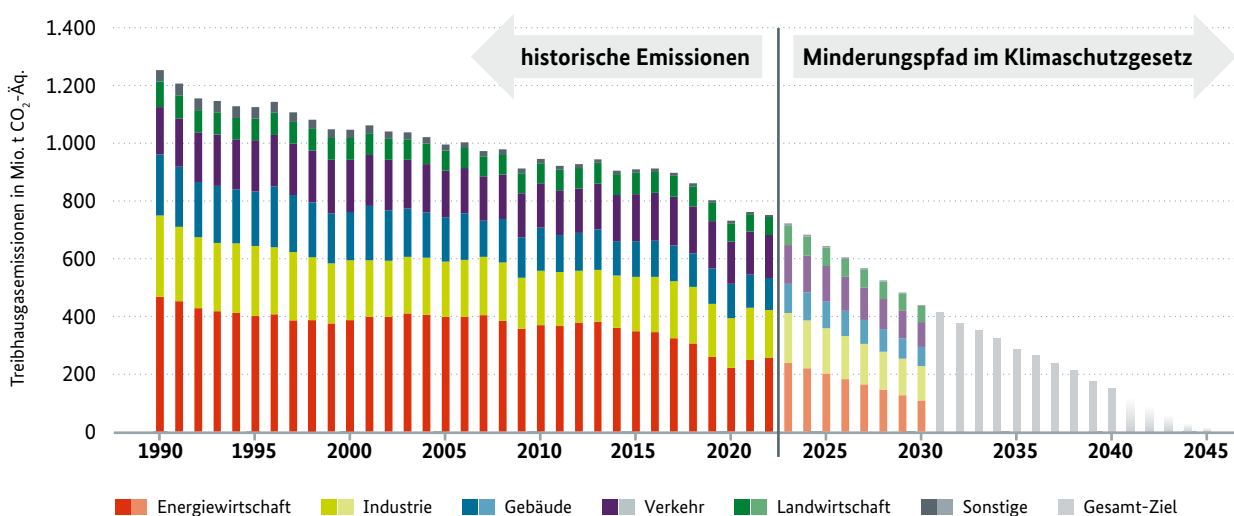
Deutschland hat sich noch in der letzten Legislatur mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) gesetzlich dazu verpflichtet, bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu werden. Nach der Bundestagswahl 2021 ist die neue Bundesregierung mit Klimaschutz und Energiewende als zentralen Prioritäten in die 20. Legislaturperiode gestartet. In der Präambel des Koalitionsvertrags von SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP haben die Koalitionäre die Verpflichtung bekräftigt, die Klimaschutzziele von Paris zu erreichen. National, in Europa und international sollen die Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik auf den 1,5-Grad-Pfad ausgerichtet werden. Dabei geht es darum, die nationalen, europäischen und internationalen Klimaschutzziele zu erreichen und zugleich in Deutschland und Europa einen starken Wirtschaftsstandort zu sichern.

Um diesen Plänen Rechnung zu tragen, hat das BMWK im Januar 2022 in einem ersten Schritt eine klimapolitische Bestandsaufnahme vorgenommen. Die „Eröffnungsbilanz Klimaschutz“ des BMWK hat nüchtern und transparent den immensen aufgestauten Handlungsbedarf im Bereich Klimaschutz offengelegt. Die Eröffnungsbilanz zeigt, dass die Klimaziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes bis zum Jahr 2030 fast eine Verdreifachung der bisherigen Geschwindigkeit der Emissionsminderung erfordern. Die Eröffnungsbilanz Klimaschutz war zugleich der Startschuss, um Deutschland auf Kurs in Richtung Klimaziele zu bringen.

Der Ausbruch des Ukraine-Kriegs stellt die Energiepolitik vor große Herausforderungen.

Gut einen Monat später hat der brutale Überfall der Russischen Föderation auf die gesamte Ukraine am 24. Februar 2022 die politische Großwetterlage

Abbildung 1: Treibhausgasemissionen in Deutschland



schlagartig verändert. Der Angriffskrieg stellt nicht nur eine eklatante Verletzung des Völkerrechts und eine Zäsur der Beziehungen zu Russland dar, sondern führte auch in Deutschland, Europa und vielen Drittstaaten zu immensen Herausforderungen für die Wirtschafts- und Energiepolitik. Dabei wurde besonders deutlich, dass Deutschland eine hohe Abhängigkeit von günstigen Energieimporten aus Russland hatte, für die in kürzester Zeit politische Alternativen gefunden werden mussten.

Um die Versorgung mit Energie zu sichern, wurden zahlreiche Maßnahmen ergriffen. Die Bundesregierung hat sehr schnell alternative Bezugsquellen für Kohle, Erdgas und Öl erschlossen und kurzfristige Maßnahmen zur Energie-, insbesondere zur Gaseinsparung, auf den Weg gebracht. Hierzu gehören u. a. mehrere Novellen des Energiesicherheitsgesetzes (EnSiG), die Umsetzung des Ersatzkraftwerkebereithaltungsgesetzes (EKBG), die Einführung verpflichtender Füllstandvorgaben für Gasspeicheranlagen sowie die Schaffung neuer Infrastrukturen für den Import von Flüssigerdgas (LNG). Denn Gasimporte werden noch für einen Übergangszeitraum benötigt, bis sie durch erneuerbare Energien und Wasserstoff abgelöst werden können. Insofern bleibt es auch über die akute Krise hinaus wichtig, die Importdiversifizierung durch den Aufbau von LNG-Kapazitäten abzusichern.

Parallel wurden zahlreiche Maßnahmen zur finanziellen Entlastung auf den Weg gebracht, damit insbesondere Strom und Wärme für Menschen und Unternehmen bezahlbar geblieben sind. Es wurden seit Frühjahr 2022 drei Entlastungspakete mit einem Umfang von 95 Milliarden Euro geschnürt und ein Abwehrschirm von 200 Milliarden Euro aufgespannt, mit dem unter anderem die Preisanstiege bei Strom, Gas und anderen Energieträgern begrenzt wurden. Diese Anstrengungen haben sich bezahlt gemacht: Trotz erheblicher Herausforderungen konnten sowohl eine Energiemangellage als auch eine schwerere

Wirtschaftskrise verhindert werden. Gleichwohl ist klar, dass eine Rückkehr zum günstigen russischen Gas nicht stattfinden kann und die Energiepreise damit auf absehbare Zeit nicht mehr das Vorkriegsniveau erreichen werden.

Energiepolitik muss weiterhin verschiedenen Zielsetzungen Rechnung tragen.

Das Krisenmanagement des vergangenen Jahres verdeutlicht, dass Energiepolitik neben dem Klimaschutz auch weiterhin anderen Zielsetzungen Rechnung tragen muss, um erfolgreich zu sein: Versorgungssicherheit und Bezahlbarkeit von Energie bleiben auch zukünftig zentrale Ziele, wobei sicherheitspolitische Überlegungen stärker als in der Vergangenheit mitbeachtet werden müssen. Diese Aspekte sind zentral für den sozialen Frieden innerhalb der Gesellschaft sowie die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts und somit für die gesellschaftliche Wohlfahrt und Akzeptanz. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist zentrale Voraussetzung, um die Umgestaltung des Energiesystems erfolgreich innenpolitisch umsetzen zu können. Daher wird Energiepolitik auch künftig verschiedene Ziele in Einklang bringen müssen.

Eine erfolgreiche und ambitionierte Transformation bedeutet nicht nur, Treibhausgasemissionen schnell und massiv zu senken, sondern zugleich ökonomisch und sozial nachhaltig zu agieren und sich resilient aufzustellen, um neuen Krisen vorzubeugen. Ziel ist eine Transformation zur klimaneutralen Erneuerung des Wohlstands. Dabei kommt es auch darauf an, die Lehren aus der Energiekrise und der damit verbundenen Zeitenwende zu ziehen, neuen Krisen vorzubeugen und Komplementaritäten zwischen Energiewende und Energiesicherheit zu nutzen. Das Energiesystem muss dazu einer fortlaufenden Analyse unterzogen werden, mit der Risiken frühzeitig identifiziert und adressiert werden. Dazu ist stärkere

Zusammenarbeit aller handelnden Akteure, national wie international, erforderlich. Dies ist eine bleibende Aufgabe, die die Transformation begleiten wird.

Der Krieg in der Ukraine hat 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 steigert diese Politik die Unabhängigkeit von fossilen Energieimporten. Bei künftig notwendigen Energieimporten kann nun mehr Sorge für Diversifizierung und strategische Souveränität getragen werden. Eine gesteigerte Unabhängigkeit von fossilen Energieimporten schützt darüber hinaus die Verbraucherinnen und Verbraucher sowie die Unternehmen vor den Preisschwankungen internationaler fossiler Energiemärkte.

Im vergangenen Jahr wurden zentrale Transformationsfortschritte erzielt.

Während der Fokus der politischen und öffentlichen Debatte im vergangenen Jahr häufig auf der Bekämpfung der Energiekrise lag, hat die Bundesregierung – neben dem akuten Krisenmanagement – auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene bereits zentrale Weichen für die sozial-ökologische Transformation gestellt:

Mit dem Energiesofortmaßnahmenpaket wurde die größte energiepolitische Novelle seit Jahrzehnten beschlossen. Hierfür wurden unter anderem das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG) sowie das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) ambitioniert reformiert, sowie ein Windflächenbedarfsgesetz eingeführt.

Zielmarke ist, dass 2030 mindestens 80 Prozent des in Deutschland verbrauchten Stroms aus erneuerbaren Quellen stammen. Für die Umsetzung wurde und wird an vielen verschiedenen Stellschrauben gedreht. So wurde beispielsweise gesetzlich verankert, dass der Ausbau erneuerbarer Energien im „überragenden öffentlichen Interesse“ liegt und der öffentlichen Sicherheit dient, was Genehmigungsverfahren erheblich beschleunigt.

Trotz kurzfristiger Energiesicherheitsmaßnahmen im Kraftwerkspark ist zudem ein zentraler Meilenstein beim deutschen Kohleausstieg erreicht worden. Nach einer Einigung mit dem Land Nordrhein-Westfalen und RWE hat die Bundesregierung die Abschaltung der verbliebenen sieben Kohlekraftwerke im Rheinischen Revier bis 2030 beschlossen; der Kohleausstieg erfolgt dort somit acht Jahre schneller als bislang geplant. Damit wird die Transformation in einer historischen Kohleregion Deutschlands vorangetrieben, ohne zu vergessen, dass soziale Gerechtigkeit und nachhaltige Zukunftsperspektiven für die Menschen und Gemeinden in der Region im Mittelpunkt stehen.

Auf europäischer Ebene hat die Bundesregierung den größten Teil des „Fit-for-55“-Pakets – als eines der umfassendsten klima- und energiepolitischen Pakete der EU-Geschichte – ausverhandelt. Die Verhandler der Mitgliedstaaten, des Europäischen Parlaments und der Kommission haben sich im Dezember 2022 unter anderem auf eine deutliche Stärkung und Ausweitung des Europäischen Emissionshandels (EU-ETS) sowie die Einführung eines Klimasozialfonds geeinigt. Rund 85 Prozent aller europäischen Treibhausgasemissionen sind damit zukünftig von einem EU-ETS erfasst. Die Zertifikatmenge sinkt kontinuierlich ab – entsprechend der europäischen Klimaziele. Dies bedeutet, dass die CO₂-Bepreisung in Zukunft einen zentralen, marktwirtschaftlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten wird.

Info-Box: Steigende CO₂-Preise durch ETS-Reform zu erwarten

Die Reform des Europäischen Emissionshandelssystems im Rahmen des „Fit for 55“-Pakets umfasst folgende Kernelemente:

- eine beschleunigte Verringerung der Emissionsobergrenze (Cap) im bestehenden EU-Emissionshandel für Energie, Industrie und den innereuropäischen Luftverkehr (ETS1: -62 Prozent in 2030 gegenüber 2005, bisher -43 Prozent; ab 2040 keine neuen Zertifikate mehr) und eine ambitionierte Fortführung der Marktstabilitätsreserve, also des Instruments zum Abbau von historischen Zertifikatsüberschüssen;
- die Einbeziehung des internationalen Seeverkehrs in den bestehenden ETS1 und
- die Einführung eines neuen separaten Brennstoffemissionshandels auf EU-Ebene mit sinkendem Cap für die Emissionen im Gebäudesektor, im Straßenverkehr und in kleinen Industrieanlagen, die nicht vom bestehenden System erfasst sind (ETS2).

Zudem wurde die kostenlose Zuteilung grundlegend reformiert, so dass stärkere Anreize für den Umstieg auf CO₂-arme und CO₂-neutrale Produktionstechnologien gesetzt werden. Beispielsweise erhalten künftig auch Elektrolyseure für die Herstellung von Wasserstoff eine kostenlose Zuteilung. Gleichzeitig wird die kostenlose Zuteilung durch die Einführung des CO₂-Grenzausgleichsmechanismus in ausgewählten Branchen bis 2034 vollständig ersetzt.

Die Europäische Kommission geht in ihrer Folgenabschätzung zum aktuellen EU-Klimaziel davon aus, dass der überwiegende Anteil der Emissionsreduktion im bestehenden Emissionshandelssystem im Energiesektor erbracht werden wird (ca. -70 Prozent in 2030 gegenüber 2015). Aber auch in der Industrie rechnet sie mit einer deutlichen Beschleunigung der Emissionsreduktion (ca. -22 Prozent in 2030 gegenüber 2015). Darüber hinaus geht sie davon aus, dass im Seeverkehrssektor die Emissionen nicht mehr steigen, sondern durch die Einbeziehung in das EU-ETS ebenfalls sinken.

Der CO₂-Preis im ETS1 lag nach einem rapiden Anstieg in 2021 (von ca. 30 Euro/t auf ca. 80 Euro/t, Jahresdurchschnitt: ca. 50 Euro/t) im zurückliegenden Jahr 2022 im Durchschnitt bei 80 Euro/t. Aktuelle Preisschätzungen von Marktanalysten erwarten für die Folgejahre allesamt weiter steigende Preise.

Mit der Einführung des ETS2 ab 2027 werden erwartbar alle brennstoffbedingten Emissionen einem steigenden CO₂-Preis unterliegen. Dabei ist das Preisniveau unter anderem von der künftigen Ausgestaltung der Klimapolitik abhängig: Je mehr flankierende Maßnahmen wie Förderung und Ordnungsrecht ergriffen werden, desto niedriger der CO₂-Preis. Ohne weitere Maßnahmen könnte ein europäischer CO₂-Preis im Gebäude- und Verkehrsbereich im Jahr 2030 zwischen 100 und 200 Euro/t erreichen und bis 2045 weiter deutlich ansteigen. In Deutschland gilt für diese Bereiche ein nationaler CO₂-Preis von derzeit 30 Euro/t.

Auf internationaler Ebene haben wir unter deutscher G7-Präsidentschaft wichtige Fortschritte im Bereich Klimaschutz und Energiewende erreicht: Die G7-Staaten haben sich zum gemeinsamen Ziel einer überwiegend dekarbonisierten Stromversorgung bis 2035 bekannt sowie dazu, ihre Kohleverstromung zu beenden. Auch haben die Staats- und Regierungschefs der G7 im Dezember 2022 die Gründung eines offenen und kooperativen internationalen Klimacclubs beschlossen, um das globale Ambitionsniveau beim Klimaschutz zu stärken, Wettbewerbsnachteile von Klimaschutzvorreitern zu verringern und zugleich Carbon Leakage zu verhindern.

Die Klima- und Energiepartnerschaften des BMWK unterstützen durch den energie- und klimapolitischen Austausch auf Regierungsebene die Umsetzung der globalen Energiewende in nunmehr rund 30 Partnerländern. Zudem setzen sie Impulse für energiewirtschaftliche Innovationen und für wirtschaftliche Zusammenarbeit mit dem Ziel einer wirtschaftlich attraktiven, nachhaltigen, kosteneffizienten und versorgungssicheren Energiesystemtransformation und der Dekarbonisierung weiterer Sektoren. Im Sinne einer diversifizierten Versorgung mit erneuerbaren Energien stehen die Kooperationen zu Wasserstoff verstärkt im Fokus der Partnerschaften.

Der Zwischenbericht zur Systementwicklungsstrategie gibt einen Überblick für die weitere Transformation des Energiesystems.

Trotz dieser wichtigen Transformationsfortschritte im Jahr 2022 liegen noch viel Arbeit und große Herausforderungen vor uns. Zugleich bleibt nur ein extrem kurzer Zeithorizont, um diese zu bewältigen. Schließlich soll Deutschland nach den Vorgaben des noch in der letzten Legislaturperiode beschlossenen Bundes-Klimaschutzgesetzes bis 2045 treibhausgasneutral sein. Nach den Versäumnissen in der Vergangenheit müssen in dieser Legislaturperiode viele Maßnahmen beschleunigt umgesetzt und weitere Rahmenbedingungen zur Zielerreichung gesetzt werden. Insbesondere mit Blick auf die notwendigen Infrastrukturen muss die notwendige Transformation vom Ziel her gedacht und eine langfristige Vision eines treibhausgasneutralen Deutschland im Jahr 2045 entwickelt werden. Dazu sind wir auch mit Blick auf die vom Bundesverfassungsgericht geforderte „Generationengerechtigkeit“ angehalten.

In diesem Sinne liefert der Zwischenbericht zur Systementwicklungsstrategie einen Überblick über Erkenntnisse aus Szenarien, wie die Klimaziele erreicht werden können. Dabei berücksichtigt er, dass im Zeitraum bis 2045 zwangsläufig diverse Unsicherheiten bestehen. Beispielsweise wird es im Zeitverlauf technologische Entwicklungen und

Innovationen geben, deren Entwicklung unter anderem durch die Energieforschung unterstützt wird. Es geht daher nicht darum, die Umsetzung der Energiewende bis zum Jahr 2045 starr und unabänderbar durchzuplanen. Vielmehr bietet der Zwischenbericht auf Basis des heutigen Wissensstands Orientierung für den weiteren Transformationsprozess des Energiesystems. Er entwickelt robuste Transformationspfade, mit denen die Klimaziele erreicht werden können und die zugleich ausreichend Flexibilität bieten, um auf Änderungen der Umweltbedingungen reagieren zu können. Dort, wo verschiedene technologische Optionen existieren, wird im Sinne des Wirtschaftsstandorts und zum Schutz der Verbraucherinnen und Verbraucher für die kommenden Jahre die kostengünstigere und effizientere Variante priorisiert, ohne auszuschließen, dass es in Zukunft andere Entwicklungen geben könnte.

Der Zwischenbericht zur Systementwicklungsstrategie basiert auf den BMWK-Langfristszenarien als wissenschaftliche Grundlage und leitet davon Weiteres ab.

Dieser Zwischenbericht ist im laufenden Prozess der Systementwicklungsstrategie (SES) erstellt worden. Die SES soll ein sektorübergreifendes Leitbild und eine robuste Strategie für die Transformation des Energiesystems entwickeln, an denen sich verschiedene Folgeprozesse orientieren können. Diese Prozesse sind Infrastrukturplanungen, z. B. der Netzentwicklungsplan (NEP) Strom, der NEP Gas/Wasserstoff, sowie sektor- und energieträgerspezifische Strategien und Programme, z. B. das Bundesgesetz Wärmeplanung, die Nationale Wasserstoffstrategie, die Nationale Biomassestrategie, die Plattform Klimaneutrales Stromsystem oder die Roadmap Systemstabilität.

Info-Box: BMWK-Langfristszenarien

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ werden im Auftrag des BMWK Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Energiesystems modelliert, in denen die energie- und klimapolitischen Ziele erreicht werden. Die Modellierung umfasst das gesamte Energiesystem, also übergreifend die Erzeugung von Strom, Wärme und Wasserstoff sowie die Nachfrage nach Energie in den Sektoren Industrie, Verkehr, Gebäude und Geräte. Auch die Energieinfrastrukturen (Strom und Gase) werden modelliert.

Im Fokus der Analyse steht dabei nicht die Entwicklung eines einzelnen „Leitszenarios“. Vielmehr werden unterschiedliche Szenarien untersucht, um so Erkenntnisse über die Vor- und Nachteile alternativer Pfade für die Transformation des Energiesystems zu gewinnen.

Die Analysen werden durch ein Forschungskonsortium, bestehend aus dem Fraunhofer ISI, der Consentec GmbH, dem Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) und der TU Berlin, durchgeführt. Nähere Informationen zu den Langfristszenarien sind unter www.langfristszenarien.de zu finden.

Die SES gewährleistet die Kohärenz der verschiedenen Strategien und Programme im Sinne eines effizienten Gesamtsystems. Die SES wird auf Grundlage der BMWK-Langfristszenarien in einem transparenten Prozess unter Einbindung der Fachöffentlichkeit erstellt (siehe Info-Box für nähere Informationen zu den BMWK-Langfristszenarien als wissenschaftliche Grundlage der SES). Die Deutsche Energie-Agentur (dena) unterstützt als Geschäftsstelle den Erstellungsprozess der SES. Nähere Informationen zur SES sind unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/ses.html> verfügbar.

Nachfolgend werden in Abschnitt 2 zunächst sektorübergreifende Gegebenheiten erläutert, die für die Transformation des Energiesystems von zentraler Bedeutung sind. Anschließend werden in Abschnitt 3 die Nachfragesektoren Industrie, Gebäude und Verkehr betrachtet. In Abschnitt 4 wird dargelegt, wie die Energienachfragen durch das Energieangebot gedeckt werden können. In Abschnitt 5 werden die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Energieinfrastrukturen dargestellt. In Abschnitt 6 werden wesentliche Erkenntnisse in einem Fazit zusammengefasst.

2. Sektorübergreifende Eckpunkte



Die Klimaneutralität Deutschlands bis 2045 erfordert eine hohe Transformationsgeschwindigkeit in allen Sektoren.

Wir haben uns in Deutschland, in Europa und vielen Teilen der Welt zur Klimaneutralität verpflichtet, um die Erderwärmung zu begrenzen. Um dieses Ziel zu erreichen, bleibt uns nicht mehr viel Zeit. Zudem gibt das Bundes-Klimaschutzgesetz ambitionierte Zwischenziele vor, 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 umfassender Umbau des Energiesystems erforderlich. In den Energie nachfragenden Sektoren müssen die Energie- und Ressourceneffizienz gesteigert sowie Prozesse und Technologien auf die Nutzung klimaneutraler Energieträger umgestellt werden. Gleichzeitig muss das Angebot klimaneutraler Energieträger durch den umfassenden und schnellen Ausbau der erneuerbaren Energien massiv ausgeweitet werden. Um Angebot und Nachfrage zu verbinden, bedarf es einer Anpassung der Energieinfrastrukturen. Die Stromnetze müssen stark ausgebaut und eine Wasserstoffinfrastruktur geschaffen werden. Weichenstellungen hierfür sind bereits heute erforderlich, um Planungssicherheit zu schaffen.

Energieeffizienz begrenzt den Energiebedarf und entlastet damit das Energiesystem.

Kurz- und mittelfristig trägt Energieeffizienz dazu bei, den Verbrauch fossiler Energieträger wie Erdgas und Mineralöl zu begrenzen. Dies reduziert unmittelbar die Treibhausgasemissionen.

Doch auch langfristig bleibt die effizienzbedingte Reduktion des Energieverbrauchs eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Transformation des Energiesystems. Energieeffizienz reduziert den Energiebedarf und begrenzt damit zukünftig den ohnehin hohen Bedarf an erneuerbaren Energien. Ferner steigen mit einem höheren Energieverbrauch die Anforderungen an die Energieinfrastrukturen. Energieeffizienz begrenzt daher die Kosten und den Flächenbedarf für die Energiebereitstellung und die erforderlichen Infrastrukturen.

Um die Klimaziele in den Energie nachfragenden Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr zu erreichen, ist der Einsatz von erneuerbarem Strom im Rahmen der sogenannten Sektorkopplung zentral. Der Strom kann in den Nachfragesektoren entweder direkt genutzt werden (z.B. Elektromobilität, Wärmepumpen) oder zunächst in Wasserstoff umgewandelt werden, der gegebenenfalls noch in Wasserstoffderivate wie synthetische Kohlenwasserstoffe (z.B. synthetische Flüssigkraftstoffe (Power-to-Liquids, PtL)) weiter transformiert wird.

Die direkte Nutzung von Strom mittels Wärmepumpen und Elektromobilität ist dabei mit deutlich geringeren Umwandlungsverlusten verbunden und entlastet aufgrund der höheren Energieeffizienz das Energiesystem bei der Bereitstellung des Energieangebots. Dies begrenzt den ohnehin hohen Bedarf an erneuerbaren Energien im zukünftigen Energiesystem.

Zudem ist angesichts der hohen Bedeutung von Energieträgerkosten ein Transformationspfad, der auf eine starke Elektrifizierung des Energiesystems setzt, mit deutlich geringeren Kosten verbunden als ein Transformationspfad, der verstärkt auf Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe setzt. Dies zeigt der Kostenvergleich alternativer Transformationspfade in den BMWK-Langfristszenarien (siehe nachfolgende Info-Box).

Es gibt jedoch Bereiche, in denen die direkte Nutzung von Strom nicht möglich ist bzw. die Elektrifizierung mit einem zu großen Aufwand für den Umbau verbunden wäre. Dementsprechend sind für Treibhausgasneutralität trotz der vergleichsweise hohen Kosten und Umwandlungsverluste dieser Energieträger Wasserstoff und Wasserstoffderivate unverzichtbar. Allerdings sollten diese Energieträger insbesondere in ansonsten nur schwer zu dekarbonisierenden Bereichen eingesetzt werden. Hierzu zählen beispielsweise der Luft- und Seeverkehr sowie bestimmte Industrieprozesse (z. B. Chemie- und Stahlindustrie). Außerdem wird Wasserstoff als langfristig speicherbarer Energieträger für

die Rückverstromung im Umwandlungs- bzw. Kraftwerkssektor benötigt. Wie die nachfolgenden Abschnitte zur Energienachfrage und zum Energieangebot zeigen, sind also trotz dieser begrenzten Anwendungsbereiche für das Ziel der Treibhausgasneutralität erhebliche Mengen an Wasserstoff und seinen Derivaten erforderlich. Dementsprechend sind Elektrifizierung und Wasserstoff keine Gegensätze, sondern ergänzen sich im Energiesystem der Zukunft. Es ist sowohl ein ambitionierter Hochlauf von Elektrifizierungstechnologien wie Elektromobilität und Wärmepumpen als auch der Wasserstoffwirtschaft erforderlich.

Info-Box: Kosten alternativer Transformationspfade in den BMWK-Langfristszenarien

Die drei Hauptszenarien der BMWK-Langfristszenarien unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Bedeutung der eingesetzten Energieträger in den Nachfragesektoren:

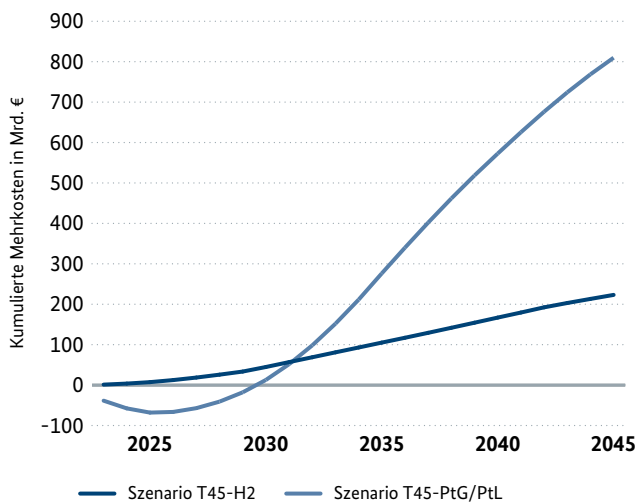
- Szenario T45-Strom: sehr hoher Anteil von direktelektrischen Lösungen (Elektromobilität, Wärmepumpen)
- Szenario T45-H₂: hoher Anteil von Wasserstoff
- Szenario T45-PtG/PtL: hoher Anteil von synthetischen Kohlenwasserstoffen

Der Kostenvergleich dieser Szenarien zeigt, dass das Szenario T45-Strom, das am stärksten auf Elektrifizierung setzt, mit den geringsten Kosten verbunden ist. In der Abbildung unten sind bis zum Jahr 2045 die kumulierten Differenzkosten im Vergleich zum kostengünstigsten Szenario T45-Strom dargestellt.

Das Szenario T45-PtG/PtL mit einem hohen Anteil synthetischer Kohlenwasserstoffe ist mit Abstand das teuerste Szenario und bis 2045 mit kumulierten Mehrkosten von rund 800 Mrd. Euro verbunden. Zwar können im Vergleich zu den anderen Transformationspfaden am stärksten bestehende Infrastrukturen weitergenutzt werden. Allerdings führen vor allem die höheren Brennstoffkosten mit zunehmender Durchdringung zu sehr hohen Kosten – trotz günstiger Kostenannahmen für synthetische Kohlenwasserstoffe.



Abbildung 2: Kumulierte Mehrkosten im Vergleich zum Szenario T45-Strom



Ebenso führen im Szenario T45-H2 vor allem die höheren Brennstoffkosten, die generell im Vergleich zu anderen Bestandteilen des Energiesystems mit Abstand der bedeutendste Kostenblock sind, zu deutlichen Mehrkosten im Vergleich zum Szenario T45-Strom. Das Szenario T45-H2 ist bis 2045 mit kumulierten Mehrkosten von rund 225 Mrd. Euro verbunden. Zwar ist der Energieträger Wasserstoff günstiger als synthetische Kohlenwasserstoffe, allerdings fallen zusätzliche Kosten unter anderem für die Umstellung der Heizsysteme, den Umbau von Infrastrukturen und die Errichtung von Wasserstofftankstellen an.

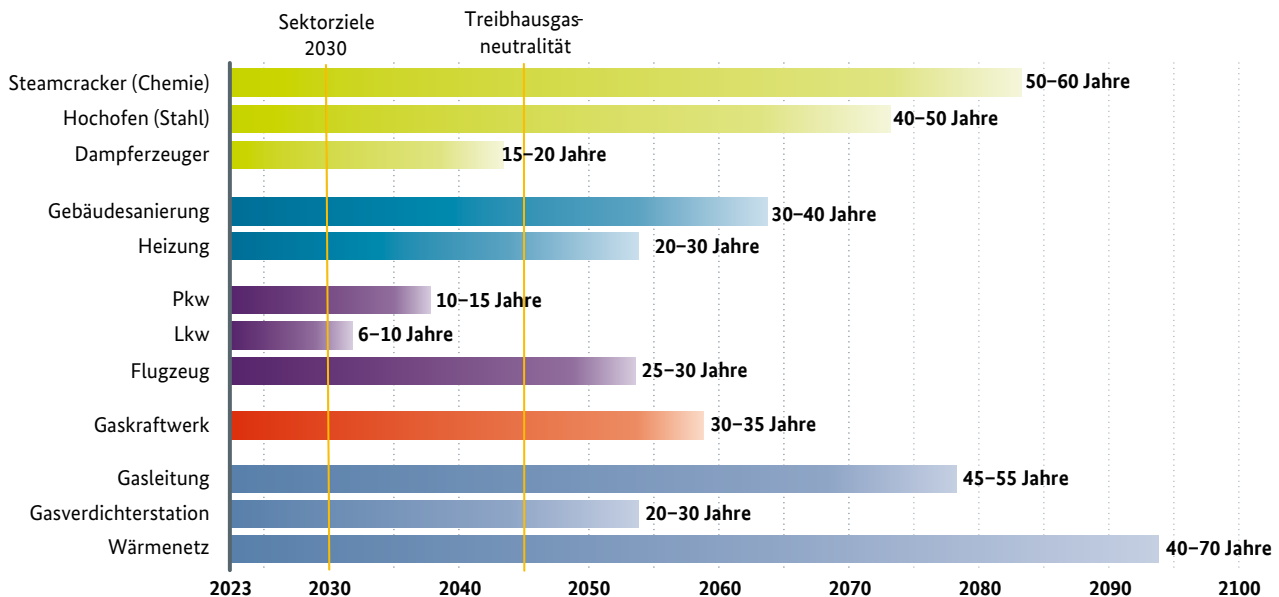
Heutige Investitionen zeichnen den Weg zur Klimaneutralität langfristig vor.

Im Energiesystem sind die Investitionszyklen in vielen Bereichen lang. 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, Kraftwerke und Netzinfrastrukturen vielfach lange Lebensdauern von deutlich über 20 Jahren auf. Insofern müssen neue Investitionen schon heute auf das Ziel Klimaneutralität ausgelegt sein. Eine Rechnung, die auf den nächsten Investitionszyklus mit dann vielleicht noch effizienteren klimaschonenden Technologien bis 2045 setzt, dürfte vielfach nicht aufgehen.

Zudem benötigen viele Investitionen einen zeitlichen Vorlauf für die Planung und Realisierung – auch wenn diese Zeiträume aktuell durch Maßnahmen zur Planungsbeschleunigung, beispielsweise für den Bau von Windenergieanlagen oder Stromnetzen, teilweise verkürzt werden. Ferner müssen einzelne Technologien erst noch hochskaliert werden. Beispielsweise hat der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft gerade erst begonnen, so dass zumindest kurz- und mittelfristig nur begrenzte Mengen an Wasserstoff und Wasserstoffderivaten zur Verfügung stehen.

Vor diesem Hintergrund bestehen nur begrenzte Handlungsalternativen, um die Klimaziele zu erreichen. Dies gilt insbesondere für den Zeitraum bis 2030, der energiepolitisch schon „morgen“ ist.

Abbildung 3: Nutzungsdauern ausgewählter Technologien bei Investition im Jahr 2023



Die Transformation erfordert eine sektorübergreifende Koordinierung.

Im Rahmen der Energiewende nehmen die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen des Energiesystems und den Sektoren erheblich zu. Ursächlich hierfür ist unter anderem die zunehmende Nutzung von Strom und strombasierten Energieträgern wie grünem Wasserstoff in den Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr (Sektorkopplung).

Zugleich sind für die Transformation des Energiesystems umfangreiche Investitionen erforderlich. Akteure benötigen hierfür Investitionssicherheit. Beispielsweise benötigen Betreiber von Wasserstoffkraftwerken oder Unternehmen, die Produktionsprozesse auf Wasserstoff umstellen, eine verlässliche Aussicht, dass sie zukünftig an eine Wasserstoffinfrastruktur angeschlossen werden und in ausreichenden Mengen Wasserstoff verfügbar sein wird. Umgekehrt erfordert die Planung

einer Wasserstoffinfrastruktur unter anderem Informationen über zukünftige Standorte von Wasserstoffkraftwerken und Industriestandorten mit Wasserstoffverbrauch sowie über die Erzeugungsstandorte von Wasserstoff und mögliche Importkorridore. Hinsichtlich der Erzeugung von Wasserstoff sind zudem die Wechselwirkungen mit dem Stromsystem zu beachten (z. B. verfügbare Strommengen und Auswirkungen auf die Stromnetze). Es handelt sich also um stark interdependente Entscheidungen, die eine grundlegende sektorübergreifende Koordinierung erfordern, insbesondere im Hinblick auf die Infrastrukturen. Analoge Beispiele ließen sich für weitere Bereiche des Energiesystems anführen.

Um diesem Koordinierungsbedarf bei der Umsetzung der Energiewende gerecht zu werden, hat das BMWK den Prozess der Systementwicklungsstrategie (SES) aufgesetzt, in dessen Rahmen dieser Zwischenbericht erstellt worden ist.

3. Energienachfrage



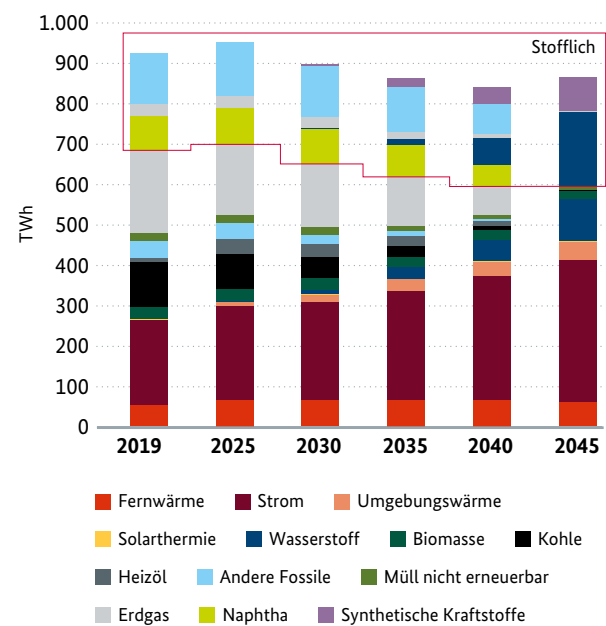
3.1 Industrie

Die Transformation führt die deutsche Industrie in eine klimaneutrale Zukunft.

Deutschland ist und bleibt ein bedeutender Industriestandort. Im Jahr 2021 erwirtschaftete das Verarbeitende Gewerbe 20,2 Prozent der gesamten Bruttowertschöpfung in Deutschland, was deutlich über dem EU-Durchschnitt von 16,6 Prozent liegt. Für diese Industrieproduktion werden gegenwärtig überwiegend fossile Energieträger wie Erdgas, Kohle und Mineralölprodukte eingesetzt. Durch die Transformation wird sich dieser Energieträgermix grundlegend ändern. Zukünftig wird der Energiebedarf der Industrie anders, nämlich klimaneutral, gedeckt. Das Ziel ist dabei der gleichzeitige Erhalt des Industriestandorts. Deshalb legt der Zwischenbericht der Systementwicklungsstrategie den Energiebedarf zugrunde, der den Erhalt der aktuell in Deutschland bestehenden Industriestruktur (inkl. Grundstoffindustrie) auch künftig sicherstellen kann.

Statt Kohle, Öl und Gas werden Strom und Wasserstoff zentral sein. Dabei wird Strom, der zunehmend aus erneuerbaren Energien stammt, zum wichtigsten Energieträger der Industrie, da die Elektrifizierung von Industrieprozessen vielfach der kostengünstigste Pfad zur Klimaneutralität ist. Ferner benötigt die Industrie erhebliche Mengen an Wasserstoff und Wasserstoffderivaten, insbesondere für den stofflichen Einsatz und schwer zu dekarbonisierende Hochtemperaturprozesse. Darüber hinaus spielen auch weitere Energieträger wie Fernwärme und Biomasse eine Rolle. Es kommt also ein Mix von unterschiedlichen Technologien zum Einsatz.

Abbildung 4: Endenergieverbrauch der Industrie und stoffliche Nutzung von Energieträgern (Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien)



Die Transformation der Industrie bedeutet tiefgreifende Veränderungen von Produktionsprozessen.

Um Klimaneutralität zu erreichen, genügt es nicht, einfach 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 der als Reduktionsmittel zukünftig grüner Wasserstoff eingesetzt wird. 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 CO₂-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 ist ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien entscheidend für international wettbewerbsfähige Energiepreise. Dies ist von zentraler Bedeutung für die Industrietransformation und die Zukunft Deutschlands als Industriestandort.

Der hohe Bedarf an erneuerbaren Energien kann durch Energie-, Material- und Ressourceneffizienz zumindest teilweise begrenzt werden. Beispielsweise kann durch Materialeffizienz in der 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 Rohstoffbedarf, sondern teilweise auch den Energiebedarf. Beispielsweise könnte in der Stahlindustrie bis 2045 der Anteil von Sekundärstahl, also Stahl, der wiederverwertet wird, von derzeit rund 30 Prozent deutlich gesteigert werden, indem Elektro Stahl vermehrt auch für Qualitätsstähle genutzt wird. Dabei wird unter anderem das Thema Schrottverfügbarkeit eine Rolle spielen. Eine solche Steigerung würde den Energiebedarf für die Primärstahlherstellung und damit den zukünftigen Wasserstoffbedarf beim Direktreduktionsverfahren reduzieren. Ferner könnte im Rahmen der Kreislaufwirtschaft Kunststoff verstärkt recycelt werden, was den Rohstoff- und Energiebedarf der Chemieindustrie reduziert.

Durch die Elektrifizierung von Industrieprozessen steigt der Strombedarf.

Auf die Prozesswärme entfällt 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 – auch wenn infolge der hohen Erdgaspreise Erdgas im vergangenen Jahr teilweise durch andere Energieträger wie Strom und Öl ersetzt worden ist. Erdgas ist insbesondere bei Dampf und Warmwasser, auf deren Erzeugung mit rund 200 TWh knapp die Hälfte des Energiebedarfs für Prozesswärme entfällt, derzeit der hauptsächlich genutzte Energieträger.

Die Elektrifizierung der Prozesswärme, insbesondere die Erzeugung von Dampf und Warmwasser mit Wärmepumpen und Elektrodenkessel, kann fossile Energieträger in der Prozesswärmebereitstellung ersetzen. Durch die Elektrifizierung von Industrieprozessen steigt der Strombedarf des Industriesektors erheblich. Die Elektrifizierung überkompensiert auch Effizienzgewinne, so dass

insgesamt der direkte Stromverbrauch der Industrie von gut 200 TWh bis 2045 voraussichtlich um rund 100 TWh auf etwa 300 TWh ansteigt.

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 von aktuell über 50 TWh pro Jahr zukünftig weiter erhöhen.

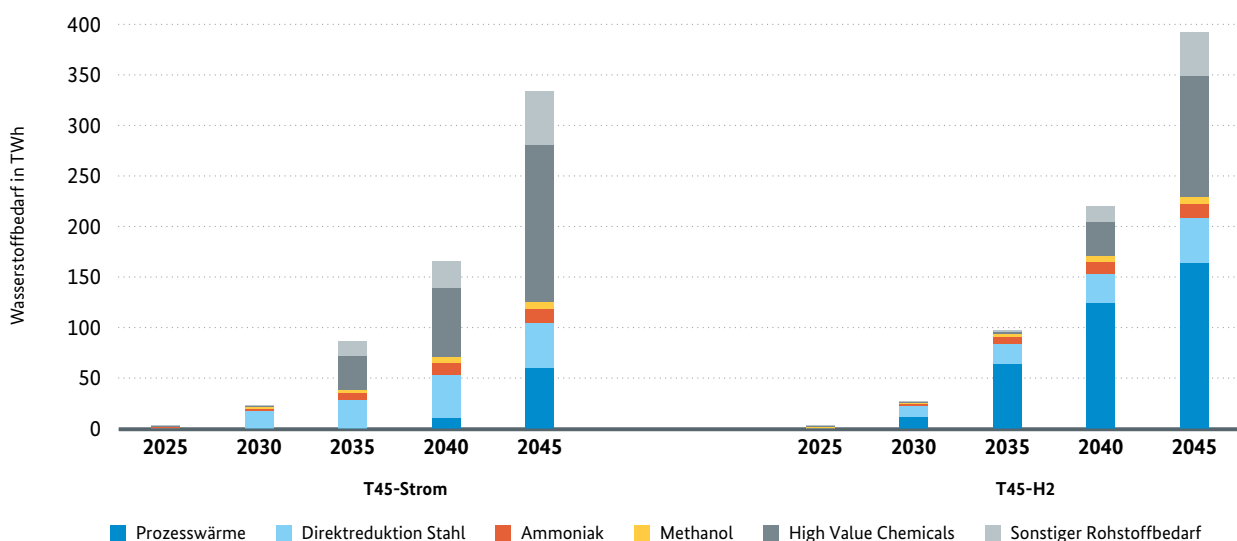
Große Mengen Wasserstoff werden insbesondere in der Chemie- und Stahlindustrie sowie teilweise bei Hochtemperaturprozessen genutzt.

Wasserstoff wird in der Industrie bereits bis 2030 in erheblichen Mengen benötigt. Zunächst wird Wasserstoff insbesondere für die Stahlherstellung benötigt. Bis 2030 werden rund 10 Mio. t der deutschen Stahlproduktion, d.h. knapp ein Viertel der gesamten Stahlproduktion, auf das Direktreduktionsverfahren umgestellt. Je Mio. Tonne Stahl werden

im Direktreduktionsverfahren voraussichtlich rund 2,2–2,4 TWh Wasserstoff als Reduktionsmittel benötigt. Das heißt: Alleine für das Direktreduktionsverfahren in der Stahlindustrie entsteht bis 2030 ein Bedarf von bis zu 22–24 TWh Wasserstoff, sofern nicht übergangsweise auch Erdgas als Reduktionsmittel genutzt wird. Weitere neue Bedarfe, beispielsweise in der Chemieindustrie, können 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 CO₂-neutralen Wasserstoff ersetzt werden.

Nach 2030 ist mit einer weiter stark steigenden Wasserstoffnachfrage zu rechnen. Unter der Annahme, dass bis 2045 ein höherer Anteil der Stahlproduktion als bisher auf Sekundärstahl entfällt, werden 2045 je nach Produktionsniveau rund 50–70 TWh Wasserstoff in der Stahlherstellung benötigt.

Abbildung 5: Neue Wasserstoffbedarfe im Industriesektor in den BMWK-Langfristszenarien



Der langfristig größte Anteil der industriellen Wasserstoffnachfrage entfällt auf die chemische Industrie. Die Chemieindustrie wird Wasserstoff in erheblichen Mengen als Grundstoff benötigen. Das genaue Volumen hängt von der zukünftigen Struktur der Wertschöpfungsketten in der Chemieindustrie ab. 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. Der mit Abstand größte Wasserstoffbedarf entfällt zukünftig auf die Produktion von HVC, insbesondere 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 bei einem angenommenen Anteil dieses Verfahrens von 70 bis 90 Prozent an der Herstellung von HVC 2045 zu einem diesbezüglichen Wasserstoffbedarf von rund 120 bis 150 TWh.

Darüber hinaus kann Wasserstoff in der Prozesswärme, insbesondere bei sehr hohen Temperaturniveaus, eingesetzt werden (Größenordnung: 100 TWh). Insgesamt benötigt der Industriesektor unter der Annahme einer weitgehend gleichbleibenden Struktur im Jahr 2045 rund 300 bis 400 TWh Wasserstoff.

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

Neben Wasserstoff kommen in der Industrie als weitere stoffliche Energieträger auch weiterhin Kohlenwasserstoffe zum Einsatz – allerdings in einem deutlich geringeren Umfang als heute und 2045 nicht mehr in fossiler Form.

Biomasse spielt weiterhin in begrenztem Umfang eine Rolle als Energieträger in der Industrie. Beispielsweise können in der Industrie anfallende Abfallstoffe, z.B. in der Papierindustrie, vor Ort genutzt werden. 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.

Synthetische Kohlenwasserstoffe wie PtL werden vor allem zur stofflichen Nutzung in der chemischen Industrie benötigt, z.B. zur Herstellung von Bitumen und Schmiermitteln. Ferner kann ein Bedarf an synthetischen Kohlenwasserstoffen für die Kunststoffherstellung entstehen, indem anstelle 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 10 bis 30 Prozent an dem für die Kunststoffherstellung produzierten Ethylen entsteht bis 2045 insgesamt ein Bedarf an PtL von rund 50 bis 80 TWh pro Jahr (inkl. PtL-Bedarf für weitere chemische Produkte wie Bitumen und Schmiermittel). Bei einem höheren Anteil von elektrischen Steamcrackern oder dem direkten Import von Methanol (als Zwischenprodukt der Kunststoffherstellung) kann der Bedarf an synthetischen Kohlenwasserstoffen auch höher ausfallen, was gleichzeitig einen entsprechenden Minderbedarf bei reinem Wasserstoff bedeuten würde.

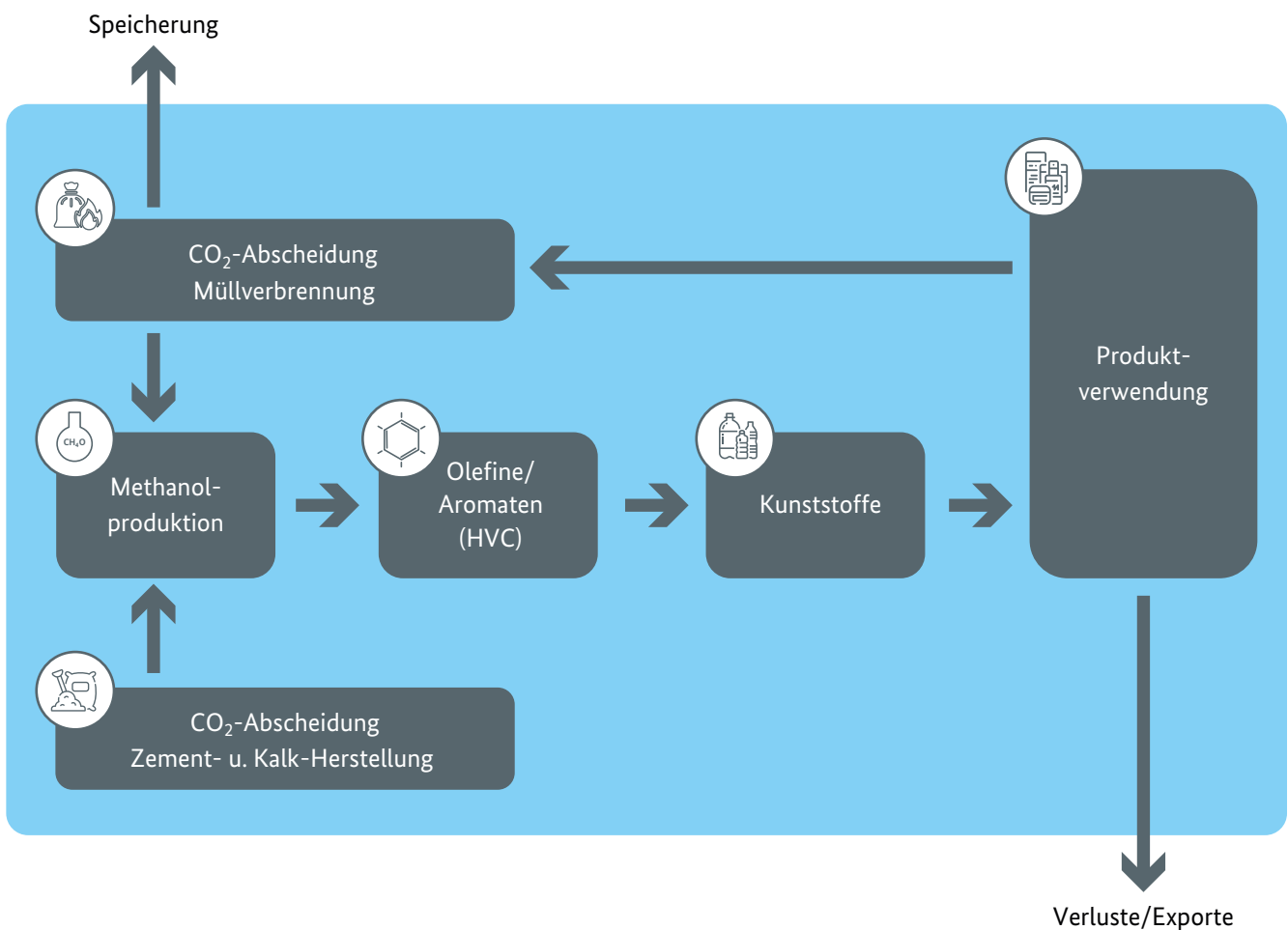
Theoretisch können synthetische Kohlenwasserstoffe auch fossile Energieträger in der Prozesswärme ersetzen. Sie haben hier jedoch erhebliche Effizienz- und Kostennachteile gegenüber einer direkten Stromnutzung und gegenüber Wasserstoff.

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 CO₂-Bedarf, vor allem für die Herstellung von Methanol, das als Grundstoff für die Kunststoffherstellung benötigt wird. CO₂ wird also zum Rohstoff für die chemische Industrie. Der Kohlenstoffbedarf der Chemieindustrie kann zukünftig somit unter anderem gedeckt werden, indem die Prozessemissionen der Zement- und Kalkindustrie und weitere schwer oder anderweitig nicht vermeidbare Emissionen, z. B. bei der Müllverbrennung, abgeschieden und als Rohstoff der Chemieindustrie zur Verfügung

Abbildung 6: Industrieller CO₂-Kreislauf



gestellt werden. Unter der Annahme einer ähnlichen Industriestruktur wie heute bewegen sich diese Kohlenstoffquellen und der CO₂-Bedarf der Chemieindustrie 2045 in einer ähnlichen Größenordnung von rund 30 Mio. t CO₂ pro Jahr. Damit diese Nutzung von CO₂ gelingen kann, ist der Aufbau einer entsprechenden CO₂-Infrastruktur erforderlich, die die CO₂-Quellen mit den Chemiestandorten, die einen entsprechenden CO₂-Bedarf haben, verbindet.

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

Da die Transformation der Industrie teilweise zu tiefgreifenden Veränderungen von Produktionsprozessen führt, sind die zukünftige Industriestruktur und die entsprechenden Anforderungen an das Energiesystem mit Unsicherheit behaftet. Dementsprechend ist auch die geografische Vertei-

lung von Energieträgerbedarfen und deren Struktur (Strom, Wasserstoff, Wasserstoffderivate) unsicher.

Die Struktur der energieintensiven Industrien ist regional häufig durch wenige sehr große Standorte geprägt. Hinsichtlich der genauen Entwicklung einzelner Standorte bestehen insbesondere bei der Umstellung auf neue Produktionsverfahren Unsicherheiten, wie die Wertschöpfungsketten und Industrieprozesse zukünftig im Einzelnen strukturiert werden, was Rückwirkungen auf die letztlichen Bedarfe der verschiedenen Energieträger und die hierfür erforderlichen Infrastrukturen hat.

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 systemische Koordinierung erforderlich.

Auswahl zentraler Maßnahmen zur Umsetzung der Transformation zur Klimaneutralität im Industriesektor

Das BMWK hat eine neue **Industriestrategie** erarbeitet, 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:

- Im Dezember 2022 konnte auf europäischer Ebene die **Reform des Europäischen Emissionshandels (EU-ETS)** erreicht werden, der das zentrale, marktwirtschaftliche Instrument für die Dekarbonisierung der Industrie ist. Der EU-ETS deckt mit rund 80 Prozent den größten Teil der Emissionen des Industriesektors ab und gibt einen verbindlichen Minderungspfad für die Treibhausgasemissionen vor.

- Darüber hinaus etablieren wir auf nationaler Ebene diverse Maßnahmen, um die Transformation der Industrie Richtung Klimaneutralität zu unterstützen. Die Dekarbonisierung in der Industrie fördern wir u. a. mit **Investitionskostenzuschüssen**, insbesondere für Unternehmen der energieintensiven Industrie mit besonders schwer oder anderweitig nicht vermeidbaren prozessbedingten Emissionen, wie der Stahl-, Chemie-, Zement- und Kalkindustrie. Im Bereich der Betriebskosten wollen wir zeitnah erste **Klimaschutzverträge** (Carbon Contracts for Difference) anbieten, sodass klimafreundliche Verfahren früher wirtschaftlich und Kosten besser planbar werden. Zudem ist es wichtig, wettbewerbsfähige Strompreise sicherzustellen und die Elektrifizierung von Industrieprozessen zu unterstützen. **Mit grünen Leitmärkten** werden z. B. über die öffentliche Beschaffung Impulse für die Nachfrage nach grünen Produkten gesetzt.
- Weitere Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz sollen über das **Energieeffizienzgesetz** sowie eine Investitionsprämie („**Superabschreibung**“) für Klimaschutz gehoben werden. Im Bereich der Ressourceneffizienz erarbeiten wir eine **Kreislaufwirtschaftsstrategie**. Zudem wollen wir in 2023 in einer **Carbon Management-Strategie** darlegen, wie insbesondere mit schwer oder anderweitig nicht vermeidbaren Emissionen in Deutschland umgegangen werden soll, wovon ein Großteil in der Industrie anfällt und dort stofflich genutzt werden könnte.

3.2 Gebäude

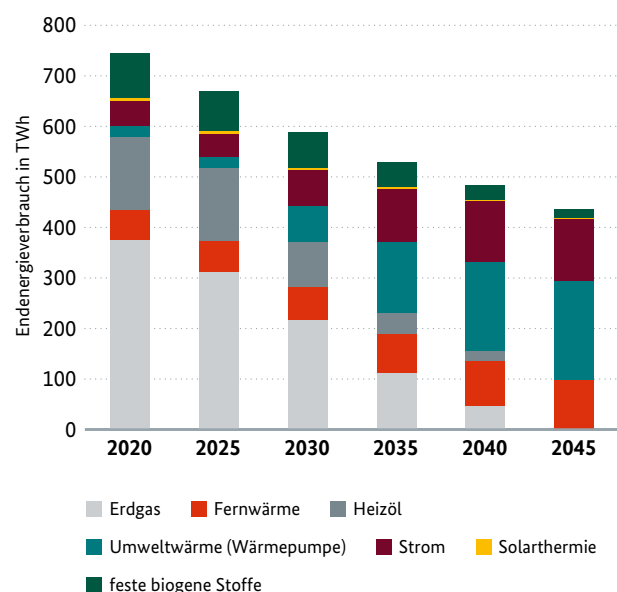
Die Kernelemente für die Klimaneutralität im Gebäudesektor sind eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz, der Einbau von Heizsystemen, die auf erneuerbaren Energien basieren, sowie der umfassende Aus- und Umbau von Wärmenetzen.

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:

1. erhebliche Steigerung der Energieeffizienz
2. massiver Hochlauf von Wärmepumpen
3. Aus- und Umbau der Wärmenetze

Abbildung 7: Endenergieverbrauch des Gebäudesektors (ohne Geräte im Haushalts- und GHD-Sektor; Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien)



Insbesondere bis 2030 bestehen kaum Handlungsspielräume und es sind alle drei Maßnahmen in hohem Maße erforderlich, um das Sektorziel von maximal 67 Mio. t CO₂-Emissionen einzuhalten. Vor allem durch die Sanierung von Bestandsgebäuden kann der Endenergieverbrauch deutlich reduziert werden, während Strom und Fernwärme zu den Säulen der zukünftigen Wärmeversorgung im Gebäudesektor werden.

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

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 weniger als 450 TWh reduziert werden. 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 250 TWh pro Jahr reduziert werden.

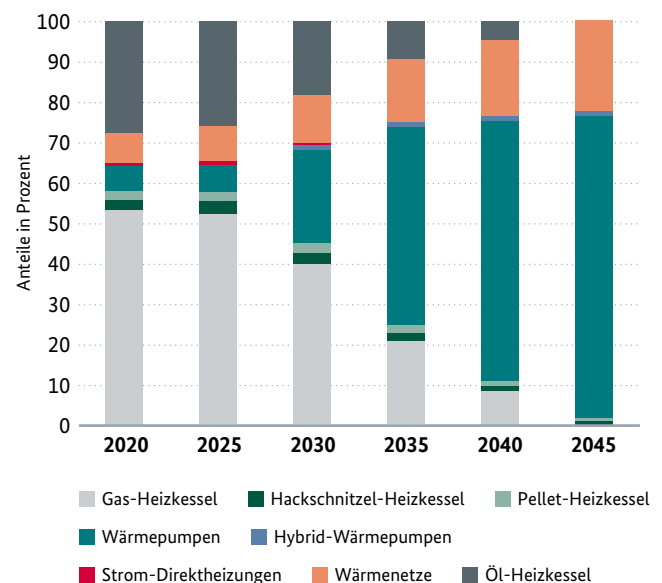
Die verbesserte Energieeffizienz mindert kurz- und mittelfristig den Bedarf an fossilen Energieträgern wie Erdgas und Heizöl und langfristig den Bedarf an erneuerbaren Energien für den Gebäudesektor. Insofern begrenzt Energieeffizienz nicht nur die individuellen Heizkosten, sondern auch volkswirtschaftlich die Energieträgerkosten. Zudem sind sanierte Gebäude mit höherem Wohnkomfort verbunden; das gilt auch in Bezug auf den in Zeiten der Klimaerwärmung immer wichtigeren sommer-

lichen Wärmeschutz. Gleichzeitig sind umfangreiche Investitionen notwendig.

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 ein sukzessiver Austausch dieser Heizungen erforderlich. Dabei sind Wärmepumpen in allen einschlägigen Energieszenarien, die Klimaneutralität erreichen, zentral für die zukünftige Wärmeversorgung von Gebäuden und werden durch weitere Technologien ergänzt.

Abbildung 8: Anteile der Heizungstechnologien (Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien)



Im Jahr 2030 sollen rund 6 Millionen Wärmepumpen eingebaut sein. Dafür müssen ab 2024 mindestens 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 noch deutlich über 10 Mio. Wärmepumpen bis 2045 nötig. Insofern ist der massive Hochlauf von Wärmepumpen in jedem Fall erforderlich.

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 je nach örtlichen Bedingungen als Aggregator für regenerative Quellen und Technologien wie industrielle Abwärme, Geothermie und Solarthermie fungieren und so umfassend Potenziale zur CO₂-Minderung erschließen.

Die Anzahl der Wärmenetzanschlüsse sollte von heute rund 1,7 Mio. bis 2045 auf über 5 Mio. gesteigert werden. Hier ist zu beachten, dass die Anschlüsse an Gebäude 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 verfügbar sein und können allein schon 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 CO₂-neutrale Quelle letztlich nur die Abscheidung von CO₂ aus der Luft verbleibt (Direct Air Capture). Dementsprechend bleiben synthetische Kohlenwasserstoffe voraussichtlich sehr teure Energieträger. Die hohe wirtschafts- und sozialpolitische Bedeutung von Energiekosten wurde Deutschland im Jahr 2022 schmerzlich vor Augen geführt.

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 Energiekosten bei der Nutzung von Wasserstoffheizungen deutlich höher als bei Wärmepumpen – was dazu führen wird, dass Privathaushalte, wo immer möglich, auf Wärmepumpen wechseln werden. Zudem müssten ange-

sichts des deutlich größeren Strombedarfs zusätzliche Stromerzeugungspotenziale zur Herstellung des Wasserstoffs erschlossen werden. Darüber hinaus können bei Wasserstoff im Gegensatz zu erneuerbarem Methan nicht die vorhandenen Gasheizungen genutzt werden, da diese nur eine begrenzte Beimischung von Wasserstoff (Größenordnung von bis zu 20 Prozent) vertragen. Zudem wären die Restriktionen anderer Endabnehmer zu berücksichtigen, die vielfach nur deutlich geringere Wasserstoffbeimischungen vertragen (z. B. industrielle Verbraucher und CNG-Tankstellen). Letztlich wären also nicht nur ein kostenintensiver Um- und Neubau der Gasnetze, sondern auch ein in den entsprechenden Netzgebieten flächendeckender Einbau von wasserstofffähigen Heizungen und unter Umständen Anpassungen bei weiteren Gasverbrauchern erforderlich.

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, so dass er auch unter Berücksichtigung des Wasserstoffbedarfs in anderen Sektoren relativ günstig verfügbar wäre. Zudem müsste für einen dezentralen Einsatz von Wasserstoff der Anschluss an ein Wasserstoffnetz gegeben sein. Dies ist insbesondere plausibel, 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 auch zunehmend in den Preisen für Biomasse niederschlagen.

Aus gesamtsystemischer Sicht sollte Biomasse dementsprechend vor allem in Gebäuden 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, oder 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 Klimaanlagen. Energieeffizienz ist zentral, um den Energiebedarf der vorhandenen und neuen Energieverbraucher zu begrenzen.

Auswahl zentraler Maßnahmen zur Umsetzung im Gebäudesektor

Wichtige Maßnahmen im Gebäudesektor konnten bereits in diesem und vergangenen Jahr auf den Weg gebracht werden bzw. befinden sich in Vorbereitung:

- Den Neubaustandard im **Gebäudeenergiegesetz (GEG)** haben wir bereits bzgl. der Anforderungen an den Primärenergieverbrauch neuer Gebäude auf das Niveau des Effizienzhausstandards 55 angehoben. Ein zentrales Instrument für die Dekarbonisierung des Gebäudesektors ist die zweite Novelle des Gebäudeenergiegesetz (GEG), die zum 1. Januar 2024 in Kraft tritt. Danach müssen zukünftig neue Heizungen grundsätzlich mit mindestens 65 Prozent erneuerbaren Energien betrieben werden.
- Die Wärmewende muss letztlich vor Ort unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten umgesetzt werden. Daher soll mit dem **Bundesgesetz für Wärmeplanung** die kommunale Wärmeplanung als zentrales Koordinierungsinstrument der Wärmewende flächendeckend eingeführt werden.
- Den Aus- und Umbau der Wärmenetze unterstützen wir finanziell mit dem **Bundesförderprogramm effiziente Wärmenetze (BEW)**, für die insgesamt rund 4 Milliarden Euro bis 2027 eingeplant sind. Das Programm fördert den Neubau und die Umstellung von Wärmenetzen auf erneuerbare Energien und unvermeidbare Abwärme. Anschlüsse an ein Wärmenetz sind über die BEG förderfähig.
- Die Energieeffizienz im Gebäudesektor verbessern wir, indem wir bei der **Bundesförderung effiziente Gebäude (BEG)** einen stärkeren Fokus auf die energetische Gebäudesanierung gesetzt haben. Ein Förderbonus für die energetisch schlechtesten Gebäude verstärkt den Sanierungsanreiz und adressiert die größten Treibhausgasminderungspotenziale. Mit dem Bonus für seriell Sanieren reizen wir ein innovatives Marktsegment zusätzlich an, um mittelfristig eine Kostendegression zu erzielen. Die gesetzlichen Regelungen der zweiten GEG-Novelle flankieren wir zudem mit einer sehr auskömmlichen Förderung in Form direkter Zuschüsse zu den Investitionskosten für den Heizungsaustausch. Neben einer Grundförderung für alle Wohn- und Nichtwohngebäude können in Kombination mit weiteren Boni in Abhängigkeit des Einkommens und für den frühzeitigen Heizungstausch bis zu 70 Prozent der Kosten gefördert werden.
- Darüber hinaus wurden weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz umgesetzt oder befinden sich in der Ausarbeitung, darunter das **Energieeffizienzgesetz**.

3.3 Verkehr

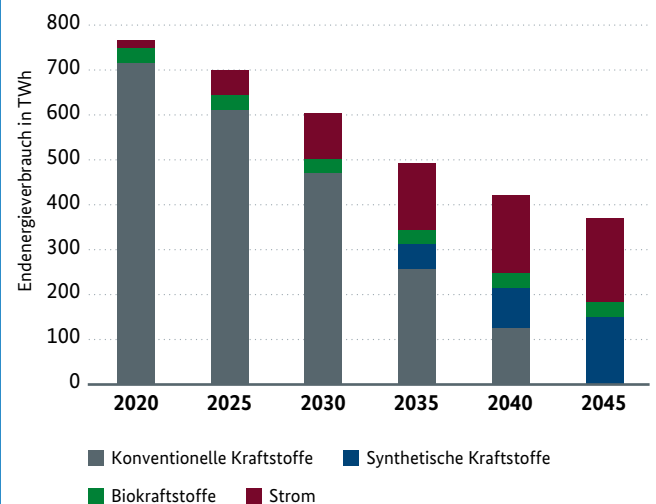
Im Verkehrssektor werden fossile Kraftstoffe im Straßenverkehr weitgehend durch Strom und im Luft- und Seeverkehr insbesondere durch synthetische Kraftstoffe ersetzt.

Derzeit werden im Verkehrssektor jährlich über 700 TWh fossile Kraftstoffe genutzt, insbesondere in Form von Diesel, Benzin und Kerosin. Angesichts des hohen Anteils fossiler Energieträger ist eine sehr hohe Transformationsgeschwindigkeit nötig, um die Sektorziele bis 2030 und Klimaneutralität 2045 zu erreichen. Da über 95 Prozent der inländischen Treibhausgasemissionen des Verkehrs auf den Straßenverkehr entfallen (davon wiederum knapp zwei Drittel auf den Pkw-Verkehr und ein gutes Drittel auf Nutzfahrzeuge), ist insbesondere eine Umstellung des Pkw- und Lkw-Verkehrs erforderlich. Im Straßenverkehr wird zukünftig Strom der dominierende Energieträger sein. Zudem benötigt der Verkehrssektor in einem erheblichen Umfang synthetische Kraftstoffe, die vor allem im Luft- und Seeverkehr, aber auch im Schienenverkehr 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, aber auch Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Gleichzeitig wächst durch den Umstieg auf Elektromobilität die Bedeutung von Strom, was sich in einem entsprechenden Anstieg des Stromverbrauchs niederschlägt.

Abbildung 9: Endenergieverbrauch des Verkehrssektors (Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien)



Darüber hinaus können Verkehrsverlagerung und -vermeidung den Energieverbrauch des Verkehrssektors weiter reduzieren. Dadurch werden kurz- und mittelfristig CO₂-Emissionen und langfristig der Bedarf an erneuerbaren Energien gemindert. Zur Verkehrsvermeidung tragen beispielsweise vermehrtes Homeoffice und der Verzicht auf Geschäftsreisen durch virtuelle Meetings bei. Die Verlagerung von Personen- und Güterverkehr von der Straße auf die Schiene setzt unter anderem entsprechend attraktive Angebote im öffentlichen Personennahverkehr und bei der Bahn voraus.

Pkw und die meisten Lkw fahren mit Strom, insbesondere im Schwerlastverkehr können auch weitere Energieträger eingesetzt werden.

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. Insbesondere auf langen Strecken und bei hohen Transportgewichten können bei Lkw zudem alternative Antriebstechnologien bzw. Energieträger wie Wasserstoff oder synthetische Kohlenwasserstoffe (Power-to-Liquids, PtL) wahrscheinlich 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 synthetische Kohlenwasserstoffe.

Im Luft- und Seeverkehr stoßen batterieelektrische Lösungen und Brennstoffzellen an ihre Grenzen und sind hier nur in wenigen Fällen anwendbar (z. B. Regionalflugzeuge). Insbesondere 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 Flüssigkraftstoffen (PtL) 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 können Wasserstoff nutzen.

Auswahl zentraler Maßnahmen zur Umsetzung im Verkehrssektor

Im Verkehrssektor werden gemäß den Ergebnissen des Koalitionsausschusses vom 28. März 2023 unter anderem folgende Maßnahmen auf den Weg gebracht:

- 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.
- Die Finanzierung der Investitionen in die Schiene soll wesentlich über einen **CO₂-Aufschlag auf die Lkw-Maut** in Höhe von 200 Euro pro Tonne CO₂ gedeckt werden, der zum 1. Januar 2024 eingeführt wird. Zugleich werden emissionsfreie Lkw bis Ende 2025 von der Infrastrukturgebühr befreit und zahlen anschließend lediglich 25 Prozent des regulären Satzes. Ferner wird die **Lkw-Mautpflichtgrenze** ab 2024 auf Nutzfahrzeuge ab 3,5 Tonnen abgesenkt.
- Durch **Ausbaumaßnahmen** und **Verbesserungen der Angebotsqualität** soll die Attraktivität des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und des Radverkehrs erhöht werden. Zudem wurde das **Deutschland-Ticket** eingeführt.
- 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. Zudem wird die **Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen** mit alternativen klimaschonenden Antrieben und der Tank- und Ladeinfrastruktur bis 2028 verlängert.
- Die **Einführung und Nutzung synthetischer Kraftstoffe** soll durch diverse Maßnahmen, z.B. Abbau von rechtlichen und administrativen Hemmnissen sowie Forschungsförderung, vorangetrieben werden.

4. Energieangebot



Die Transformation der Nachfragesektoren stellt hohe Anforderungen an das Energieangebot zur Bereitstellung CO₂-neutraler Energieträger in Form von Strom sowie Wasserstoff und Wasserstoffderivaten.

In den Nachfragesektoren Industrie, Gebäude und Verkehr werden zunehmend Strom und strombasierte Energieträger wie Wasserstoff und synthetische Kohlenwasserstoffe genutzt (Sektorkopplung). 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. Es sind zukünftig 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 550 TWh pro Jahr. Der Stromverbrauch in Deutschland wird sich also langfristig mehr als verdoppeln.
- **Wasserstoff:** Die größten Wasserstoffmengen werden zukünftig in der Industrie benötigt, insbesondere in der Chemie- und Stahlindustrie und teilweise auch bei Hochtemperaturprozessen. Beim Fortbestand der jetzigen Industriestruktur benötigt allein der Industriesektor in 2045 rund 300 bis 400 TWh Wasserstoff pro Jahr. Hinzu kommen Wasserstoffbedarfe aus dem Verkehrs- und Umwandlungssektor. Im Verkehrssektor könnte bei einem relativ hohen Anteil von Brennstoffzellen-Lkw im Schwerlastverkehr eine Wasserstoffnachfrage von bis zu 50 TWh entstehen. Im Umwandlungssektor wird Wasserstoff in Wasserstoffkraftwerken für die Rückverstromung und in begrenztem Umfang für die Wärmebereitstellung in Wärmenetzen benötigt. Insgesamt erscheint aus heutiger Sicht in 2045 eine Größenordnung für die 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. Angesichts der Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung der Produktionsmengen und der unterschiedlichen Optionen zur zukünftigen Strukturierung der Prozesse und Lieferketten kann der Bedarf an Wasserstoffderivaten, beispielsweise in Form von Ammoniak oder Methanol, auch höher ausfallen und teilweise den oben genannten Bedarf an reinem Wasserstoff reduzieren.

Die Erschließung ausreichender 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 Elektrifizierung. Zum anderen ist der Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung für die Produktion von grünem Wasserstoff und dessen Derivaten erforderlich. Für die Versorgung der Nachfragesektoren mit Strom und strombasierten Energieträgern wie Wasserstoff und dessen Derivate ist daher die Erschließung ausreichender Stromerzeugungspotenziale essenziell.

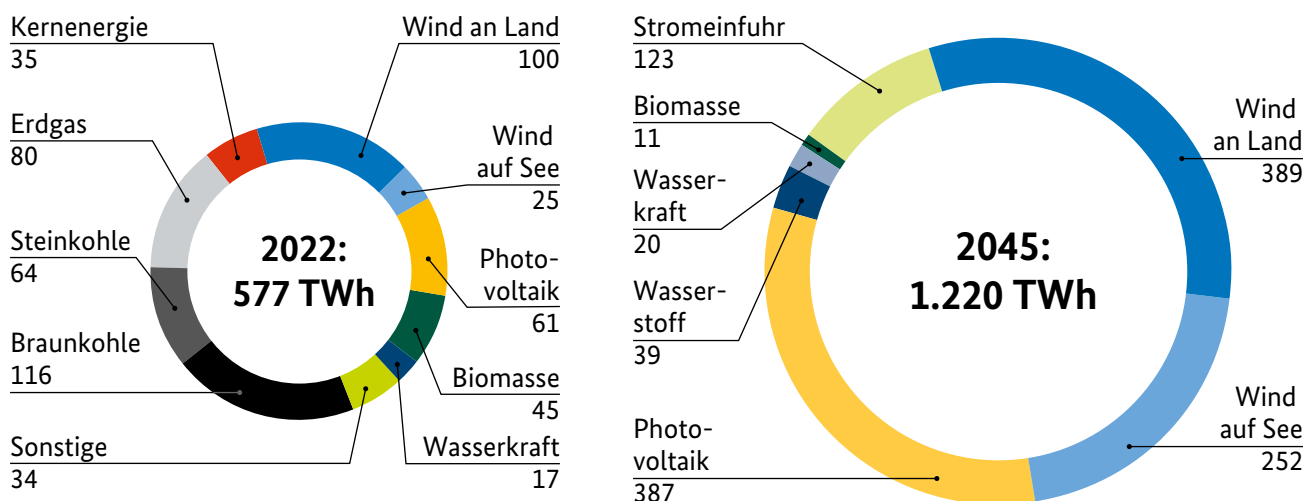
Angesichts des hohen Bedarfs ist neben einem massiven Ausbau der inländischen Stromerzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien weiterhin der Import von Strom bzw. strombasierten Energieträgern erforderlich. Die direkte Elektrifizierung und Energieeffizienz begrenzen dabei den ohnehin schon hohen Bedarf an Stromerzeugungskapazitäten im In- und Ausland und damit auch den Flächenbedarf.

4.1 Stromerzeugung

Wind und PV sind die Säulen des zukünftigen Stromsystems und müssen sehr schnell entsprechend der gesetzlichen Ziele ausgebaut werden.

Strom aus Windenergie und Photovoltaik deckt zukünftig mit Abstand den Großteil der Stromnachfrage. Damit müssen sie einen wesentlichen Beitrag zur Stabilität des Stromsystems leisten. Hinzu kommt weitere Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien wie Biomasse und Wasserkraft. Die Stromerzeugung aus steuerbaren Kraftwerken stammt zukünftig aus Kraftwerken, die mit Wasserstoff betrieben werden. Ferner wird Deutschland zukünftig auch erneuerbaren Strom aus Regionen mit großen und kostengünstigen Stromerzeugungspotenzialen importieren, z. B. aus dem Nordseeraum (siehe hierzu auch Abschnitt 4.4).

Abbildung 10: Stromerzeugungsmix in Deutschland



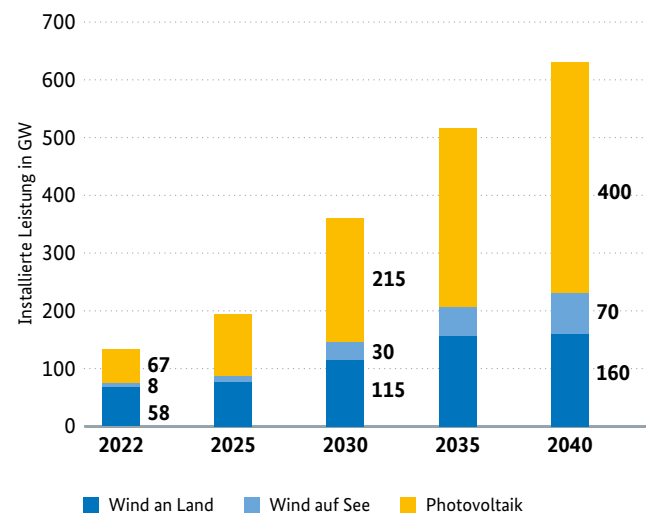
Quelle: AG Energiebilanzen (links), Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien (rechts)

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 58 GW auf 115 GW steigen, bei Wind auf See von aktuell rund 8 GW auf 30 GW und bei Photovoltaik von aktuell rund 67 GW auf 215 GW.
- Bis 2040 soll die installierte Leistung bei Wind an Land auf 160 GW, bei Wind auf See auf 70 GW und bei Photovoltaik auf 400 GW steigen. 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, welche Stromerzeugungskapazitäten im Nord- und Ostseeverbund sowie in den Nachbarstaaten installiert werden und 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 2022 wurden 2,3 GW neu installiert, nachdem in 2021 sogar nur 1,85 GW hinzukamen. 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 2022 wurden Photovoltaik-Anlagen mit einer Leistung von 7,2 GW installiert nach 5,7 GW im Jahr 2021. Die Richtung stimmt also, das Tempo muss aber weiter deutlich beschleunigt werden, insbesondere bei Wind an Land.

Abbildung 11: Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland gemäß Ausbauzielen des EEG



Der Kohleausstieg soll idealerweise bis 2030 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 CO₂-Kosten bereits vor 2038, möglichst bis 2030 vollständig beendet wird. 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 zum Einsatz. Dementsprechend müssen neue Gaskraftwerke zukünftig auf die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff umgestellt werden können („H₂-ready“). 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 (durchschnittliche Größenordnung: 1.000 Volllaststunden; das Jahr hat 8.760 Stunden).

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, je mehr Flexibilitätspotenziale – beispielsweise durch flexible Stromverbraucher – genutzt werden können und je mehr Strom innerhalb Europas gehandelt werden kann, um großräumige Ausgleichseffekte bei der Stromnachfrage und erneuerbaren Stromerzeugung nutzen zu können. Dementsprechend variiert die langfristig benötigte Erzeugungsleistung von Wasserstoffkraftwerken in Szenarien durchaus erheblich und liegt 2045 in der Größenordnung von 40 bis 70 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 2022 wurden aus Biomasse rund 44 TWh Strom erzeugt (rund 8 Prozent des Stromverbrauchs). Langfristig wird die Stromerzeugung aus Biomasse

deutlich sinken, da das nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial begrenzt und der Einsatz in anderen Sektoren, beispielsweise in der Industrie und schwer zu dekarbonisierenden Verkehrsbereichen, deutlich wertvoller ist. Im Umwandlungssektor verbleibt im Kern die Gülle, da diese schlecht transportierbar ist und somit häufiger vor Ort verstromt werden wird. Als steuerbare thermische Kraftwerke fungieren daher zukünftig 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 zudem zukünftig 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 Energiekooperation in der Europäischen Union etwa durch Gemeinschaftsprojekte wie Bornholm Energy Island wird dafür vorangetrieben. 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.

4.2 Wärmebereitstellung in Wärmenetzen

Die Energienachfrage aus Wärmenetzen wird überwiegend durch Großwärmepumpen, Geo- und Solarthermie sowie Abwärme gedeckt.

Wärmenetze sind von zentraler Bedeutung für einen klimaneutralen Gebäudesektor und können zudem die Industrie mit Prozesswärme versorgen. Daher ist der 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. Über die Abwärme hinaus werden Großwärmepumpen, Geothermie- und Solarthermieranlagen sowie Wärmespeicher zentrale Technologien sein.

Großwärmepumpen weisen besonders hohe Potenziale auf. Sie versorgen Gebäude und die Industrie über das Wärmenetz effizient mit Wärme und können Wärmequellen nutzen (bspw. in Flüssen), die durch kleine Wärmepumpen nicht erschlossen werden können. Je nach Vorhandensein entsprechender lokaler Potenziale für Geothermie, Abwärme und mit Abstrichen auch Solarthermie werden auch diese Quellen signifikante Beiträge zur Wärmebereitstellung in Wärmenetzen liefern können. Mögliche Abwärmequelle ist beispielsweise ansonsten ungenutzte industrielle Prozesswärme. Zukünftig werden auch neue Abwärmepotenziale entstehen, beispielsweise durch Rechenzentren. Entsprechende Potenziale sollten jeweils vor Ort im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung geprüft werden.

Wasserstoff ergänzt die Wärmebereitstellung 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. Es sinken die Zeiträume, in denen unter Berücksichtigung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien noch ein zusätzlicher Strombedarf zur Deckung der Stromnachfrage und zudem gleichzeitig ein Bedarf zur Wärmeerzeugung in Wärmenetzen besteht. Gleichzeitig müssen Strom- und Wärmeversorgung im Winter in Zeiten mit wenig Wind abgesichert werden. Insofern wird die KWK in einem klimaneutralen Energiesystem nicht mehr die Hauptrolle bei der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen übernehmen, sondern die Wärmebereitstellung durch Großwärmepumpen, Abwärme sowie Geo- und Solarthermie dann ergänzen, wenn die Erzeugung aus erneuerbaren Energien den Bedarf nicht decken kann. Zudem können Wasserstoffkessel zur Deckung von Spitzenlasten eine Rolle bei der Wärmeerzeugung in Wärmenetzen spielen.

4.3 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 CO₂-Emissionen vermieden und der Erdgasverbrauch reduziert werden. Beispielsweise kann bei einer hohen Wasserstoffverfügbarkeit die übergangsweise Nutzung von Erdgas als Reduktionsmittel in der Stahlindustrie minimiert und schon möglichst früh ein hoher Anteil von Wasserstoff bei der Direktreduktion eingesetzt werden. Ebenso könnte frühzeitig Wasserstoff Erdgas im Stromsektor ersetzen. Damit der Stromsektor bereits 2035 weitgehend klimaneutral ist, sollten zudem Wasserstoffkraftwerke als neue Technologie zeitnah erprobt werden, was ebenfalls eine entsprechende Wasserstoffverfügbarkeit voraussetzt. Zudem bietet der frühzeitige Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft industriepolitische Chancen beim globalen Wettlauf um grüne Zukunftstechnologien. Dementsprechend sollten 2030 schon rund 60 bis 90 TWh CO₂-freier Wasserstoff bzw. dessen Derivate durch inländische Erzeugung oder Importe verfügbar sein, um einen möglichst hohen Anteil des voraussichtlichen Wasserstoffbedarfs von 95 bis 130 TWh gemäß Nationaler Wasserstoffstrategie mit CO₂-freiem Wasserstoff bzw. Derivaten zu decken. 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 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. Bis 2045 sollte die wasserstoffseitige Elektrolyseleistung in Deutschland in Abhängigkeit von der Entwicklung der Wasserstoffnachfrage auf rund 55 bis 70 GW steigen; dies entspricht einer elektrischen Elektrolyseleistung von 79 bis 100 GW. Bei 3.500 Volllaststunden könnten so pro Jahr rund 190 bis 245 TWh Wasserstoff inländisch erzeugt werden und einen erheblichen Teil der Wasserstoffnachfrage decken.

Die Wasserstofferzeugung 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 Koordinierung bedarf. Neben dem Betrieb sind insbesondere die Standorte der Elektrolyseure zentral für deren Systemintegration. Bei Elektrolyseuren handelt es sich aus Sicht des Stromsystems um große Lasten, die potenziell erhebliche Wirkungen auf die Stromnetze und den Netzausbaubedarf haben können.

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 Elektrolyseure geeignet. Dort können unter anderem die großen Stromerzeugungspotenziale der Windenergie an Land und auf See genutzt werden. Zudem befinden sich die geologischen 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 zukünftige Wasserstoffinfrastruktur verbindet die Erzeugungsregionen mit den Verbrauchszentren und Wasserstoffspeichern. Es ist ein zügiger Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur erforderlich, um auch die Verbraucher fernab der Erzeugungsregionen bereits mittelfristig sicher und zuverlässig mit Wasserstoff zu versorgen, beispielsweise Wasserkraftwerke, die vor allem im Winterhalbjahr laufen, und industrielle Wasserstoffverbraucher im Süden Deutschlands. Insbesondere bis die Wasserstofftransportinfrastruktur verfügbar ist, sollte im Sinne eines zügigen Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft auch im restlichen Bundesgebiet ein begrenzter Aufbau von Elektrolysekapazitäten erfolgen.

Ein großer Teil des Wasserstoffbedarfs wird aus Europa importiert.

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 in großen Teilen leitungsgebunden aus Europa bzw. angrenzenden Regionen erfolgen. Europa besitzt umfangreiche Potenziale zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, die für die Wasserstoffherzeugung genutzt werden sollten. Der Transport von reinem 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. Sofern also reiner Wasserstoff genutzt werden soll, erscheint unter Berücksichtigung der Transportkosten bzw. Umwandlungsverluste nach derzeitigem Stand die innereuropäische bzw. europäische Wasserstoffherzeugung in Verbindung mit einem Pipeline-Transport kostengünstiger. Schiffstransporte können 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. Bei einer hohen Wasserstoffnachfrage kann die wasserstoffseitige Elektrolysekapazität sogar noch deutlich höher ausfallen (Größenordnung: 600–800 GW). Für eine europäische Wasserstoffherzeugung müssen entsprechende Stromerzeugungspotenziale (Wind Offshore in Nord- und Ostsee sowie günstige Wind Onshore/Solar-Kombinations-Standorte in Ost- und Südeuropa oder angrenzenden Regionen wie Naher Osten oder Nordafrika) zügig erschlossen und eine entsprechende Wasserstoffinfrastruktur für den Transport geschaffen werden.

Wasserstoffderivate wie Ammoniak und PtL werden angesichts ihrer geringen Transportkosten vor allem außerhalb Europas erzeugt und importiert.

Bei Wasserstoffderivaten wie synthetischen Kohlenwasserstoffen (z. B. PtL) 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 wie PtL und Ammoniak geringer. Dementsprechend werden Wasserstoffderivate insbesondere in Regionen mit besonders kostengünstigen Erzeugungspotenzialen außerhalb Europas hergestellt und von dort importiert.

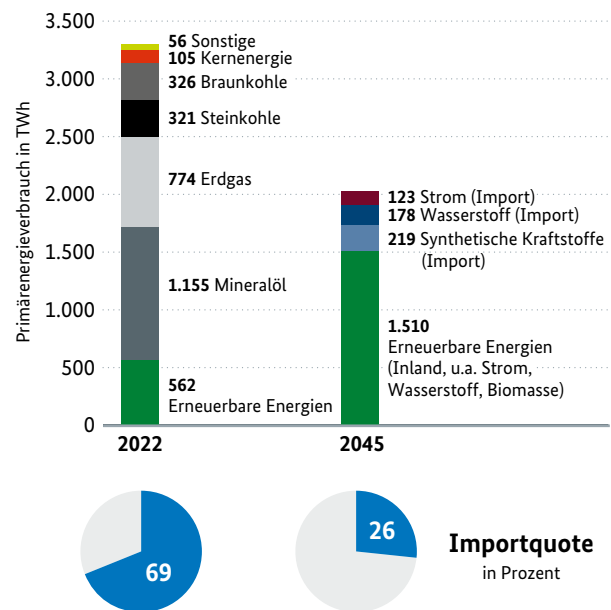
4.4 Energieimporte und Energiehandel

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

Aktuell werden rund 70 Prozent des Energieaufkommens 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 bedeutenderen 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 die Versorgungssicherheit. Unter anderem aus Gründen der Kosteneffizienz wird Deutschland zwar auch langfristig Energie importieren, aber deutlich weniger als bisher. Anstelle von fossilen Energieträgern werden zunehmend

Abbildung 12: Entwicklung Primärenergieverbrauch und Importquote



Quelle: AG Energiebilanzen (links), Szenario T45-Strom der BMWK-Langfrist-szenarien (rechts)

Strom und Wasserstoff sowie Wasserstoffderivate auf Basis erneuerbarer Energien importiert. Insgesamt verringert sich die Importquote bis 2045 deutlich auf etwa 30 Prozent.

Es sollte eine Diversifizierung der Energieimporte über verschiedene Importregionen 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 – so lag der Anteil von Erdgas aus Russland am deutschen Erdgasbedarf 2021 bei rund 55 Prozent – vermieden.

Durch die stärkere Nutzung von Strom und Wasserstoff werden verbleibende Energieimporte zudem verstärkt aus Ländern der Europäischen Union bezogen. Dies betrifft beispielsweise Strom- und Wasserstoffimporte aus Offshore-Kooperationsprojekten mit Nachbarstaaten in Nord- und Ostsee. Die Energiewende verbessert so Deutschlands Sicherheit. Gegenwärtig werden in Europa im Zuge des europäischen Green Deal ambitionierte Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien verankert. Da das letzte Ausbauniveau der erneuerbaren Energien und der Aufbau der Transportachsen in Europa noch unsicher sind, sollten darüber hinaus auch weitere Importoptionen geschaffen werden. Für Wasserstoffimporte könnten europa-nahe Regionen, z.B. Nordafrika und der Nahe Osten (MENA, Middle East and Northern Africa), per Pipeline angebunden werden. Bei Wasserstoffderivaten ist angesichts der geringen Transportkosten und der Erzeugungskostenvorteile in besonders wind- und sonnenreichen Regionen ohnehin ein Import aus anderen Weltregionen sinnvoll, wobei auch hier eine starke Diversifizierung stattfinden sollte. Dabei sollte von vornherein auch eine Stärkung der eigenen Entwicklungsperspektiven der Exportländer in den Blick genommen werden, um nachhaltige und sichere Energiepartnerschaften zu etablieren. Bei entsprechenden Fortschritten der Transporttechnologie könnte auch der Schiffstransport 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 marktwirtschaftlich die Versorgungssicherheit, 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.

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 Wasserstoffherzeugung 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 und könnte zukünftig Wasserstoff exportieren.

Insgesamt sollten die Transportinfrastrukturen für Strom und Wasserstoff 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.

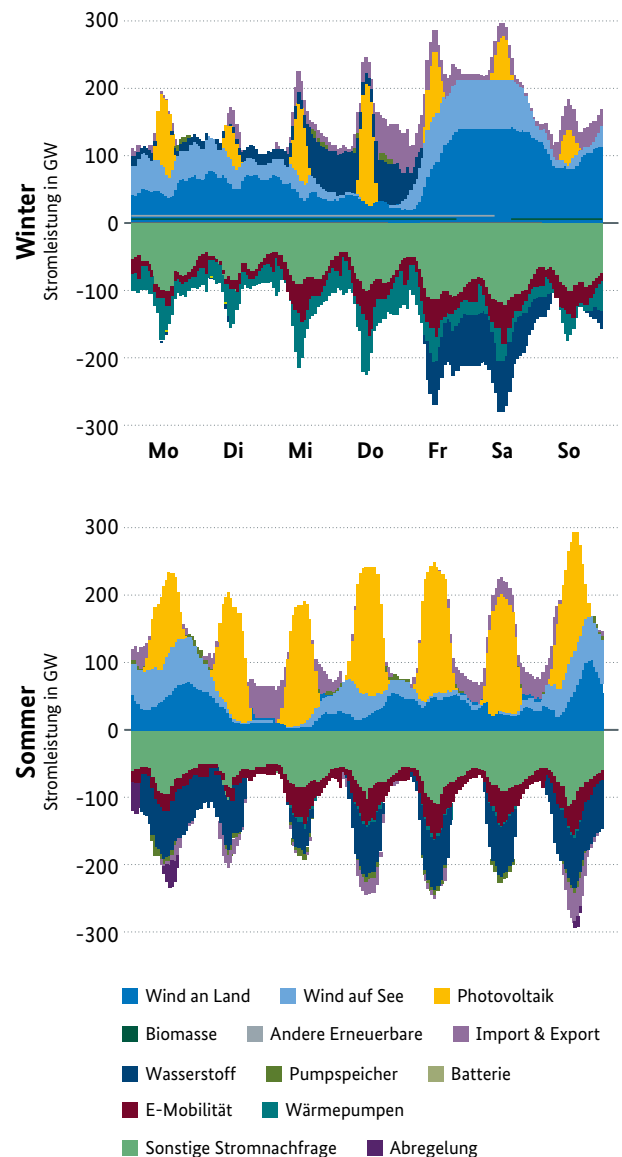
4.5 Flexibilität durch Sektorkopplung und Speicher

Elektrolyseure, Elektromobilität und Wärmepumpen bieten große Flexibilitätspotenziale.

Neben dem großräumigen Ausgleich durch Netzausbau gleichen auch neue flexible Stromverbraucher zeitliche Ungleichgewichte zwischen Erzeugung und Verbrauch aus. Elektrolyseure, Wärmepumpen und Elektroautos bieten große, kurzfristige Flexibilitätspotenziale. Elektrolyseure sollten Wasserstoff in Zeiten einer hohen Stromerzeugung 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 Sektorkopplungstechnologien zukünftig sowohl an der Erzeugung aus erneuerbaren Energien als auch an der verfügbaren Netzkapazität orientieren. In der Abbildung rechts ist diese Flexibilität jeweils beispielhaft für eine Winter- und Sommerwoche im Jahr 2045 illustriert. Des Weiteren müssen zukünftig flexible Verbrauchsanlagen und Angebote für ein digitales Nachfragemanagement einen Beitrag zur

Systemstabilität leisten. Zur Sicherstellung der Cybersecurity ist dazu unter anderem der Roll-out von Sicherheitstechnologien wie dem Smartmeter-Gateway essenziell.

Abbildung 13: Stromerzeugung und -verbrauch im Wochenverlauf (exemplarisch) im Jahr 2045 (Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien)



Auch Batteriespeicher werden eine wichtige Rolle spielen. Der Bedarf an stationären Batteriespeichern als zusätzliche Flexibilitätsoption ist in einem kostenoptimierten Gesamtsystem allerdings begrenzt, da Batterien insbesondere für die Kurzfristspeicherung geeignet sind. Viele Funktionen von stationären Batteriespeichern wie die Bereitstellung kurzfristiger Flexibilität können auch von Sektorkopplungstechnologien übernommen werden, die ohnehin für die Dekarbonisierung der Nachfragesektoren im Energiesystem umfangreich vorhanden sein werden (z. B. Batterien in Elektroautos, Wärmepumpen). Trotzdem ist vor allem aufgrund der hohen privaten Nachfrage mit einer starken Zunahme stationärer Batteriespeicher zu rechnen, wodurch dem Stromsystem weitere Flexibilität zur Verfügung steht.

Wärmespeicher sind zentral für die Wärmebereitstellung 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 Flexibilitätspotenziale für das Stromsystem, indem sie vor allem in Zeiten temporärer Erzeugungsüberschüsse aus erneuerbaren Energien betrieben werden. So können insbesondere Überschüsse aus der PV-Stromerzeugung in das Energiesystem integriert und in Form von Wärme gespeichert werden.

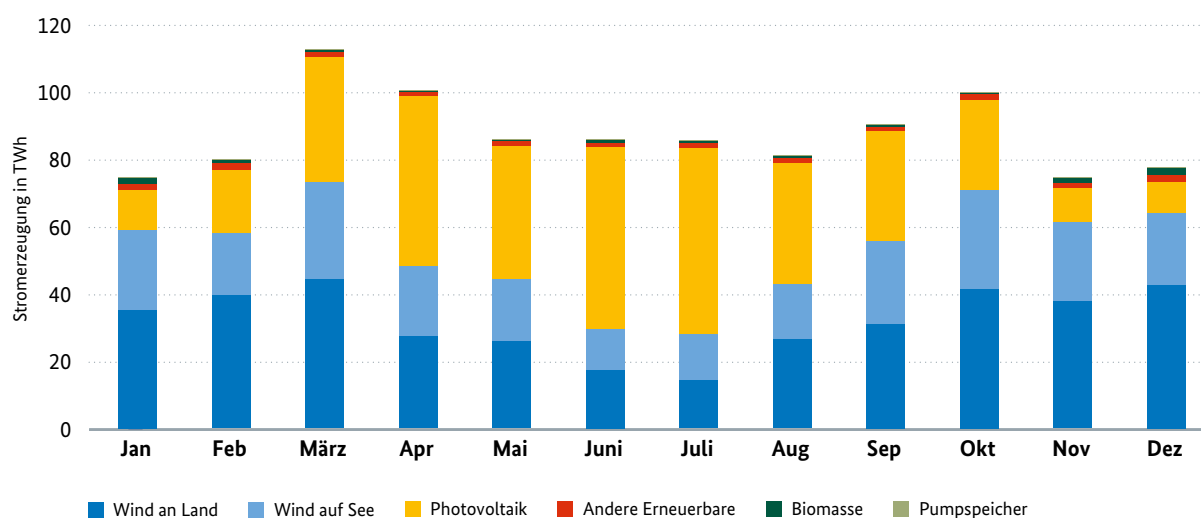
Wasserstoffspeicher gleichen saisonale Schwankungen aus und sorgen für Versorgungssicherheit.

Wasserstoffspeicher werden in Zukunft energetisch die bedeutsamste Speichertechnologie sein und dienen als saisonaler Langfristspeicher. Wasserstoffspeicher sind insbesondere für die Versorgungssicherheit 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.

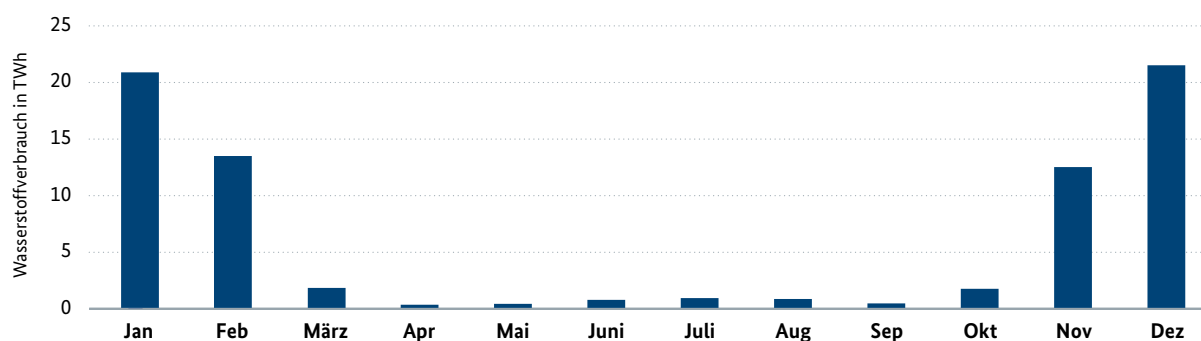
Wasserstoffkraftwerke ergänzen die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien insbesondere in den Wintermonaten. Hintergrund ist einerseits die etwas höhere Stromnachfrage im Winter, z. B. für Beleuchtung und Wärmepumpen, und andererseits das zeitliche Stromerzeugungsprofil der erneuerbaren Energien. Zwar ergänzt sich die Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik grundsätzlich sehr gut: Der Wind weht stärker im Winterhalbjahr, während Strom aus Photovoltaik insbesondere 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 auch die hohe Bedeutung des Windenergieausbaus für die Energiewende. Durch eine hohe Windstromerzeugung kann der Bedarf an ergänzender Stromerzeugung aus Wasserstoffkraftwerken, die je erzeugter Kilowattstunde mit deutlich höheren spezifischen Kosten einhergeht, begrenzt werden.

Abbildung 14: Stromerzeugung und Wasserstoffverbrauch für die Rückverstromung in Deutschland im Jahr 2045 (Szenario T45-Strom der BMWK-Langfristszenarien)

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien 2045 (ohne H2-Kraftwerke)



Wasserstoffverbrauch für die Rückverstromung 2045



Die Wasserstoffspeicherung erfordert die Erschließung neuer Kavernen.

Durch das saisonale Profil der Wasserstoffnachfrage und -erzeugung wird Wasserstoff von Frühling bis Herbst eingespeichert. Im Spätherbst erreicht der Füllstand in den Wasserstoffspeichern sein Maximum, da im Winter Wasserstoff aus den

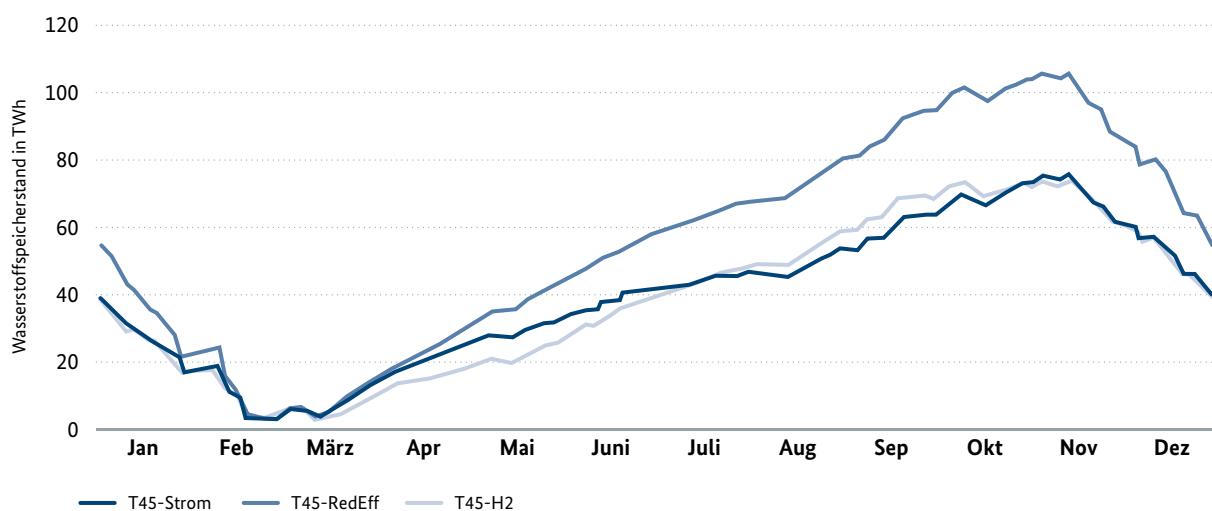
Speichern entnommen wird. Der Speicherbedarf in Deutschland liegt 2045 voraussichtlich bei 70 bis 100 TWh. In Europa wird voraussichtlich eine Kapazität zur Wasserstoffspeicherung in der Größenordnung von 300 bis 400 TWh benötigt. Erste Speicherbedarfe entstehen schon vor 2030, mit zunehmender Bedeutung der Wasserstoffkraftwerke wächst der Bedarf im Zeitverlauf stark an.

Wasserstoffspeicher können teilweise durch die Umnutzung aktueller Erdgasspeicher erschlossen werden. Deutschland verfügt über Erdgasspeicher mit einem Gesamtvolumen von rund 250 TWh. Allerdings wird eine reine Umnutzung bestehender Erdgasspeicher bis 2045 nicht ausreichen. Dies liegt insbesondere daran, dass Wasserstoff eine deutlich geringere Energiedichte als Erdgas aufweist. Ferner sind für die Wasserstoffspeicherung vor allem Kavernenspeicher geeignet, während Porenspeicher allenfalls begrenzt nutzbar sind. Im Ergebnis können nur rund 35 bis maximal 50 TWh Wasserstoff

durch die Umwidmung von vorhandenen Erdgasspeichern gespeichert werden. Zudem darf die Umwidmung von Erdgasspeichern die kurz- und mittelfristige Versorgungssicherheit mit Erdgas nicht gefährden.

Vor diesem Hintergrund müssen frühzeitig erhebliche Speicherkapazitäten für Wasserstoff geschaffen und auch neue Kavernen erschlossen werden. Angesichts des Zeitbedarfs für die Erschließung neuer Kavernen muss dies frühzeitig angegangen werden.

Abbildung 15: Füllstand der Wasserstoffspeicher in Deutschland im Jahr 2045 in den BMWK-Langfristszenarien



Auswahl zentraler Maßnahmen zur Umsetzung im Bereich des Energieangebots

Wichtige Maßnahmen konnten bereits im vergangenen Jahr auf den Weg gebracht werden bzw. befinden sich in Vorbereitung:

- Mit dem novellierten **Erneuerbare-Energien-Gesetz** (EEG 2023) und **Windenergie-auf-See-Gesetz** (WindSeeG) 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 sowie der Grundsatz, dass die Nutzung der erneuerbaren Energien im überragenden öffentlichen Interesse liegt und der öffentlichen Sicherheit dient. 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 rechts sichere 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 in der **Wind- und PV-Strategie** enthalten.
- Zur **Förderung von Wasserstoff-Kraftwerken** im Umfang von rund 9 GW setzen wir die Verordnungsermächtigungen aus dem EEG 2023 zeitnah um. Bei Neuinvestitionen in Gaskraftwerke ist vorzusehen, dass die Kraftwerke so gebaut werden, dass sie mit vertretbarem Aufwand auf reinen Wasserstoff umrüstbar sind. Ähnliche Anforderungen gibt es für Biomethananlagen. Darüber hinaus erarbeiten wir eine **Kraftwerksstrategie**, um die Transformation des Kraftwerksparks in Richtung Wasserstoff zu unterstützen. Damit schaffen wir bereits kurzfristig Planungssicherheit für Investitionen in neue Gas- bzw. Wasserstoffkraftwerke.
- Mit der **Plattform Klimaneutrales Stromsystem** entwickeln wir gemeinsam mit Akteuren aus Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft ein neues Strommarktdesign, um die Finanzierung der erneuerbaren Energien und steuerbarer Leistung wie Wasserstoff-Kraftwerke dauerhaft zu gewährleisten und Flexibilitätsoptionen systemoptimal zu 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. Eine Übersicht über die Maßnahmen im Stromsektor ist unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/10-handlungsfelder-der-abteilung-strom.html> zu finden.
- Den Aus- und Umbau der Wärmenetze und die damit verbundene Umstellung der Wärmeerzeugung auf klimaneutrale Energieträger unterstützen wir mit dem **Bundesförderprogramm effiziente Wärmenetze (BEW)**. Das Programm fördert neben dem Aus- und Umbau der Wärmenetze die Nutzung von Großwärmepumpen, erneuerbaren Energien (z.B. Solar- und Geothermie) sowie unvermeidbarer Abwärme als Wärmequellen.



- 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. Für den Import von Wasserstoff und dessen Derivaten entwickeln wir zudem zeitnah erstmalig eine **Importstrategie**. Parallel stellen wir die Zusammenarbeit zu grünem Wasserstoff stärker in den Fokus bestehender und neuer Energiepartnerschaften und organisieren bereits über **H2Global** den Import von Wasserstoff bzw. Wasserstoffderivaten: Diese mit 900 Mio. Euro ausgestattete Bieterplattform erlaubt uns – weltweit erstmalig – einen Marktpreis für grünen Wasserstoff zu ermitteln.

5. 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.

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 Strukturierung der Wertschöpfungsketten in der energieintensiven Industrie und die Frage, 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 bieten, unter anderem 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. Durch die Schaffung alternativer Importoptionen und der hierfür erforderlichen Infrastrukturen können infrastrukturelle Abhängigkeiten, wie es in der Vergangenheit insbesondere mit den Erdgasimporten aus Russland der Fall gewesen ist, vermieden werden. Ferner sollten die Infrastrukturen für den Transport von Strom und Wasserstoff so dimensioniert werden, dass auch bei einem Wegfall einzelner Lieferanten, Importkorridore und von Leitungen bzw. Pipelines die Versorgungssicherheit gewahrt bleibt. Dies erhöht die Resilienz des zukünftigen Energiesystems, auch gegenüber Ereignissen wie Naturkatastrophen, Sabotageakten und Terroranschlägen.

5.1 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.

Die europäischen Stromaustauschkapazitäten zwischen den Ländern (Interkonnektoren) müssen über den bis 2035 bereits im Rahmen der europäischen Netzentwicklungsplanung (Ten Year Network Development Plan, TYNDP 2035) vorgesehenen Ausbau hinaus erheblich erweitert werden.

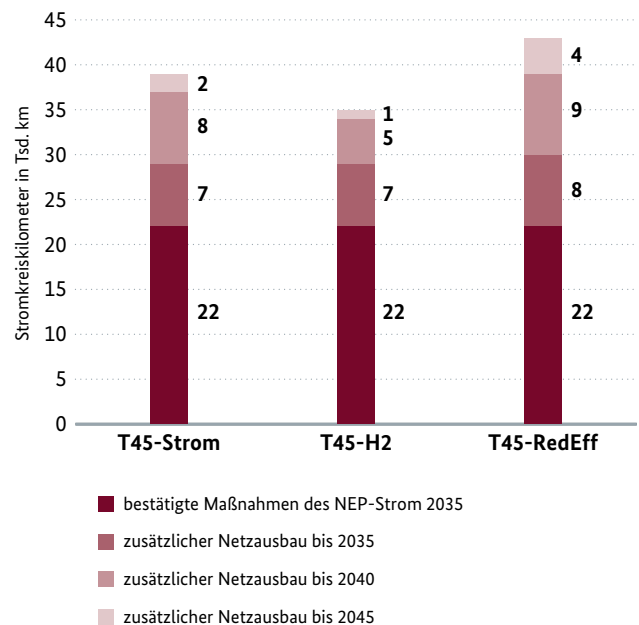
In den BMWK-Langfristszenarien werden bis 2045 die europäischen Stromaustauschkapazitäten um etwa das Zwei- bis Zweieinhalbfache ausgebaut im Vergleich zu den Planungen des TYNDP für 2035.

Analog müssen die Interkonnektorkapazitäten zwischen Deutschland und den angrenzenden Ländern deutlich ausgebaut werden. Bis 2035 sieht der Netzentwicklungsplan (NEP) Strom 2035 einen Ausbau der Interkonnektorkapazitäten Deutschlands auf ca. 40 GW vor. In den BMWK-Langfristszenarien werden die Interkonnektorkapazitäten Deutschlands bis 2045 je nach Szenario auf insgesamt 80 bis 110 GW ausgebaut.

Ebenso besteht innerhalb Deutschlands ein erheblicher Ausbaubedarf im Stromübertragungsnetz. Zu den bereits bestätigten Maßnahmen des NEP Strom 2035 im Umfang von rund 22.000 Stromkreiskilometern kommt weiterer Netzausbaubedarf hinzu. In den BMWK-Langfristszenarien übersteigt der zusätzliche innerdeutsche Verstärkungs- und Ausbaubedarf bis 2045 den bereits bis 2035 geplanten Ausbau um 60 bis 100 Prozent. Ein großer Teil des Ausbaubedarfs fällt aufgrund der beschleunigten Transformation und dem schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien bereits bis 2035 an. Beim Verstärkungsbedarf handelt es sich dabei teilweise nur um die Umrüstung bestehender Leitungen. Insgesamt steigt in den Langfristszenarien die Stromkreislänge von heute rund 35.000 km auf rund 55.000 km an.

Der erhebliche innerdeutsche Ausbaubedarf des Stromübertragungsnetzes zeichnet sich auch im aktuellen NEP Strom 2023–2037/2045 ab, der im Vergleich zu den vorherigen NEP erstmals den Zeitraum bis 2045 betrachtet. Die Übertragungsnetzbetreiber schlagen im NEP Strom 2023–2037/2045 im Vergleich zum NEP Strom 2035 diverse zusätzliche Maßnahmen vor. Der Gesamtausbaubedarf steigt im Vergleich zum NEP Strom 2035 ebenfalls um mehr als 60 Prozent.

Abbildung 16: Ausbaubedarf im deutschen Stromübertragungsnetz in den BMWK-Langfristszenarien



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. In den BMWK-Langfristszenarien verdoppeln sich die Verteilnetzkosten im Vergleich zu heute. Dies ist allerdings nicht gleichbedeutend mit einer Verdopplung

der Netzentgelte, da zukünftig der Stromverbrauch stark steigt und die Netzkosten somit potenziell auf eine deutlich größere Strommenge umgelegt werden können.

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 2035 erforderlich. Da ein Großteil der Ausbaukosten in den niedrigen Spannungsebenen auf Aufgrabungen entfällt, sollten leitungsbezogene Ausbaumaßnahmen vorausschauend erfolgen und unmittelbar einen langfristig ausreichenden Leitungsquerschnitt vorsehen.

Die Stromnetze müssen unabhängig von der exakten zukünftigen Zusammensetzung des Kraftwerksparks sicher und robust mit 100 Prozent erneuerbaren Energien betrieben werden können.

Das Stromversorgungssystem befindet sich in einem tiefgreifenden strukturellen Wandel. Damit geht ein Weiterentwicklungsbedarf für Netzbetriebskonzepte, technische Spezifikationen und Regelungen einher. Aufgrund des Rückgangs konventioneller Kraftwerke mit Synchrongeneratoren müssen deren Eigenschaften alternativ erbracht und Systemdienstleistungen sowie das Aufgabenspektrum der erneuerbaren Erzeugungsanlagen und weiterer Anlagen weiterentwickelt werden. Diese Anlagen werden im Vergleich zu konventionellen Großkraftwerken in der Regel im Verteilnetz und über leistungselektronische Stromrichter an das Stromnetz angeschlossen. Insgesamt macht dieser „elektrotechnische Wandel“ (vom Synchrongenerator zur Leistungselektronik) neue Lösungen für den Netzbetrieb und zur Sicherstellung der Systemstabilität möglich und gleichzeitig erforderlich. Mit dem beschleunigten Ausbau der erneuerbaren

Energien, insbesondere Wind und PV, und dem perspektivischen Kohleausstieg kommt dem Anpassungsprozess eine besondere Bedeutung zu. Wind und PV werden dabei zur tragenden Säule der Energieversorgung werden müssen und auch flexible Verbrauchsanlagen wie Elektrolyseure, Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen werden systemstützend wirken müssen. Zukünftig müssen außerdem Netzbetreiber (VNB/ÜNB und VNB/VNB) deutlich enger kooperieren.

5.2 Gas- und Wasserstoffnetze

Es muss eine Wasserstofftransportinfrastruktur aufgebaut werden.

Das Gasfernleitungsnetz steht vor einer tiefgreifenden Umstellung. Die Nachfrage nach Erdgas wird zukünftig stark zurückgehen. Im Jahr 2021 wurden in Deutschland noch über 1.000 TWh Erdgas verbraucht. Im Jahr 2022 ist der Erdgasverbrauch infolge der Energiepreiskrise und der Sparmaßnahmen auf rund 850 TWh gesunken. Um die Klimaziele einzuhalten, dürfen 2030 nur noch rund 750 TWh, 2040 noch rund 200 TWh und 2045 kein fossiles Erdgas mehr genutzt werden.

Während der Erdgasverbrauch zukünftig deutlich zurückgehen wird, entsteht parallel eine erhebliche Wasserstoffnachfrage, insbesondere im Industrie- und Umwandlungssektor. Der Wasserstoffbedarf 2045 wird voraussichtlich in einer Größenordnung von 360 bis 500 TWh liegen. Trotz der großen zukünftigen Bedeutung von Wasserstoff wird die Wasserstoffnachfrage deutlich geringer ausfallen als der heutige Erdgasbedarf.

Für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist die Schaffung einer Wasserstofftransportinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Das zukünftige Wasserstoffnetz verbindet die Erzeugungsregionen

mit den Wasserstoffverbrauchern, d. h. insbesondere mit den industriellen Nachfragezentren und Wasserstoffkraftwerken, und den Wasserstoffspeichern. Da neben der inländischen Erzeugung auch der Import von Wasserstoff eine große Rolle spielen wird, sollte sich die Wasserstoffinfrastruktur in ein europäisches Wasserstoffnetz einfügen. Hierfür ist eine europäische Koordination der Wasserstoffnetzplanung unter Berücksichtigung von Erzeugungs- und Nachfrageregionen sowie Speicherpotenzialen und Importachsen bzw. -Terminals sinnvoll.

Ein großer Teil des Wasserstoffnetzes kann durch eine Umwidmung von Teilen des bestehenden Gasfernleitungsnetzes aufgebaut werden. Hierfür können vielfach parallel vorhandene Leitungsstrukturen genutzt werden. Durch den rückläufigen Erdgasverbrauch können schrittweise Gasleitungen für den Transport von Wasserstoff umgerüstet werden – bei paralleler Erfüllung der dann noch jeweils vorhandenen Aufgaben des Erdgastransports.

Der Umfang des zukünftigen Wasserstoffnetzes wird deutlich kleiner ausfallen als das heutige Erdgasfernleitungsnetz, das eine Länge von rund 40.000 km aufweist. Der letztliche Umfang des Wasserstoffnetzes hängt wesentlich von den Standorten der Elektrolyse und Wasserstoffnachfrage sowie den Handelsflüssen im europäischen Wasserstoffsyst. ab. Ferner kann die Erhöhung der Resilienz für zusätzliche Leitungen sprechen. Die Leitungsplanung sollte dabei nicht nur kurz- und mittelfristig absehbare Wasserstoffverbraucher und -erzeuger berücksichtigen, sondern auch Flexibilität für Neuansiedlungen bieten.

Das Wasserstoffnetz 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, sondern

auch mit der Stromnetzplanung koordiniert werden. Zudem könnten Teile des frei werdenden Erdgasnetzes auch für den Aufbau der CO₂-Infrastruktur genutzt werden, die für die Treibhausgasneutralität des Industriesektors benötigt wird, was ebenfalls eine entsprechende Koordinierung erfordert.

Die rückläufige Gasnachfrage macht viele Gasverteilnetze unwirtschaftlich, während andere dezentrale Energieinfrastrukturen (Strom- und Wärmenetze) wachsen.

Durch die rückläufige Gasnachfrage sinkt der Bedarf an Gasverteilnetzen, die heute neben Industrie- und Gewerbebetrieben insbesondere Gebäude mit Gas versorgen und insgesamt eine Länge von rund 500.000 km aufweisen. Infolge der zukünftig abnehmenden Anzahl an Gasheizungen im Gebäudebereich, die weitgehend durch Wärmepumpen oder einen Anschluss von Gebäuden an Wärmenetze ersetzt werden, werden viele Gasleitungen nach und nach unwirtschaftlich, weil immer weniger Kunden an ihnen hängen. Dementsprechend sinkt insbesondere nach 2030 der Umfang der erforderlichen Gasverteilnetze. Spätestens ab 2045 ist zu erwarten, dass nicht für die Umstellung auf Wasserstoff oder den CO₂-Transport benötigte Teile der heutigen Gasverteilnetze stillgelegt werden.

Eine Umwidmung von Gasverteilnetzen bzw. Gasleitungen auf Wasserstoff kann in Einzelfällen sinnvoll sein, wenn industrielle und gewerbliche Verbraucher im Verteilnetz sowie Kraftwerke und KWK-Anlagen mit Wasserstoff versorgt werden oder im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung die Nutzung von Wasserstoff vorgesehen wird. Ein etwaiger regionaler Gas- bzw. Wasserstoffeinsatz in der Wärme erfordert aufgrund der Wechselwirkungen mit den Infrastrukturen und der Wasserstoffherzeugung eine abgestimmte Planung. Dabei müssen die regionale Planung der Gasverteilnetze und 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.

Zudem wirken sich der Ausbau und die Verdichtung von Wärmenetzen auf die Zukunft der Gasverteilnetze aus. Die Trassenlänge aller Fernwärmenetze ist alleine 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 künftig eine größere Rolle als heute übernehmen werden. Insgesamt ist auf dezentraler Ebene mit einem deutlich geringeren Umfang der Gasverteilnetze zu rechnen, während die Stromverteilnetze und Wärmenetze erheblich ausgebaut werden.

Auswahl zentraler Maßnahmen zur Umsetzung im Bereich der Infrastrukturen

Eine leistungsfähige Infrastruktur bildet das Rückgrat der Energiewende. Um den notwendigen Aus- und Aufbau zu gewährleisten, sind im letzten Jahr zahlreiche Maßnahmen auf den Weg gebracht worden, weitere befinden sich in der Vorbereitung:

- Bis zur ersten Jahreshälfte 2024 erarbeiten wir die **Systementwicklungsstrategie**, die unter anderem den Netzentwicklungsplänen für Strom und Gas bzw. Wasserstoff kohärente Orientierung bieten soll. Damit wird zukünftig eine Infrastrukturplanung ermöglicht, die sektorübergreifend die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen des Energiesystems berücksichtigt.
- Es wurden zahlreiche **Maßnahmen zur Beschleunigung des Stromnetzausbaus** ergriffen, unter anderem durch umfangreiche Rechtsänderungen im Rahmen des Energiesofortmaßnahmenpakets und des Gesetzes zur Änderung des Energiesicherungsgesetzes und anderer energiewirtschaftlicher Vorschriften. Der **Bundesbedarfsplan** wurde für den Ausbau der Übertragungsnetze aktualisiert und neue Projekte wurden aufgenommen, sodass der Netzausbau mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien Schritt hält. Überdies wird derzeit ein neuer Netzentwicklungsplan (NEP) Strom erarbeitet, der erstmals auf das **Klimaneutralitätsnetz** bis 2045 ausgerichtet sein wird. Auch im Rahmen der aktuellen Novelle des Energiewirtschaftsgesetzes sind Regelungen für den Stromnetzausbau enthalten. 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 Verteilnetzplanung haben wir den **Branchendialog Verteilnetze der Zukunft** initiiert. Weitere Maßnahmen befinden sich in der Ausarbeitung, u. a. im Rahmen der **Task Force Netze**.

- Wir legen zeitnah die **Roadmap Systemstabilität** vor, die gemeinsam mit Netz- und Anlagenbetreibern, Verbrauchern, technischen Normungsgremien und der Wissenschaft derzeit erarbeitet wird. In der Roadmap Systemstabilität wird aufgezeigt, welche Prozesse und Funktionalitäten für einen sicheren und robusten Systembetrieb in einem Stromsystem benötigt werden, das auf erneuerbaren Energien basiert.
- Bis Ende 2023 erarbeiten wir ein **Konzept für den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur**. Damit frühzeitig ein erstes Kernnetz zur Anbindung zentraler Wasserstoffstandorte entsteht, wird das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) novelliert. Der entsprechende Gesetzentwurf der Bundesregierung wurde am 24. Mai 2023 im Kabinett beschlossen. Zudem soll zeitnah im EnWG die gesetzliche Grundlage für einen integrierten Netzentwicklungsplan Gas und Wasserstoff geschaffen werden, damit über das Kernnetz hinaus weitere Wasserstoffherzeuger, -verbraucher und -speicher angeschlossen werden können. Eine **Roadmap** für einen neuen **Ordnungsrahmen für die Gasverteilnetze** wird erstellt.
- 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, planen wir zudem ein **Wasserstoffbeschleunigungsgesetz**.

6. Fazit



Bei der Umsetzung der Energiewende bestehen angesichts der begrenzten verbleibenden Zeit bis zum Jahr 2045 und unter Berücksichtigung der im Bundes-Klimaschutzgesetz verankerten Zwischenziele aus technisch-systemischer Sicht in vielen Bereichen nur begrenzte Handlungsoptionen und ein hoher Handlungsdruck. Dafür sorgen unter anderem vielfach lange Investitionszyklen, notwendige Planungs- und Realisierungszeiten und der Umstand, dass diverse Technologien wie z. B. Wasserstoff noch hochskaliert werden müssen.

Politik, Wirtschaft und Gesellschaft kommen deswegen nicht umhin, bereits heute Technologieentscheidungen insbesondere mit Blick auf erforderliche Infrastruktur zu treffen. In diesem Sinne liefert dieser im Rahmen der Systementwicklungsstrategie erstellte Zwischenbericht einen Überblick über die weitere Transformation des Energiesystems. Dabei berücksichtigt der Zwischenbericht, dass im Zeitraum bis 2045 zwangsläufig diverse Unsicherheiten bestehen und neue technologische Entwicklungen und Innovationen ein „Nachsteuern“ erforderlich machen können. Vor diesem Hintergrund bietet der Zwischenbericht der Systementwicklungsstrategie auf Basis des heutigen Wissensstands Orientierung für den weiteren Transformationsprozess des Energiesystems. Es skizziert robuste Transformationspfade, mit denen die Klimaziele erreicht werden können und die zugleich ausreichend Flexibilität bieten, um auf Änderungen der Umweltbedingungen reagieren zu können. Dabei gilt, dass die Versorgungssicherheit durch eine entsprechende Ausrichtung und Flankierung der Einzelmaßnahmen jederzeit gewährleistet werden kann.

In den Energie nachfragenden Sektoren Industrie, Gebäude und Verkehr ist neben einer Steigerung der Energieeffizienz die zunehmende Nutzung von Strom und strombasierten Energieträgern im Rahmen der Sektorkopplung zentral. Dabei ist die direkte Nutzung von Strom mittels Wärmepumpen und Elektromobilität vielfach der kostengünstigste Transformationspfad. Zudem spielen insbesondere in dichter besiedelten Gebieten Wärmenetze eine große Rolle, die neben Großwärmepumpen auch Geo- und Solarthermie sowie unvermeidbare Abwärme als klimaneutrale Wärmequellen nutzen. Wasserstoff und seine Derivate werden ebenfalls in großen Mengen benötigt, insbesondere in Bereichen, in denen der kostengünstige Weg der direkten Stromnutzung nicht möglich ist. Hierzu gehören insbesondere die Chemie- und Stahlindustrie sowie Teile des Verkehrssektors, vor allem der Luft- und Seeverkehr. Ferner wird Wasserstoff für die Rückverstromung in Kraftwerken und ergänzend für die Wärmebereitstellung in Wärmenetzen benötigt.

Die Transformation der Nachfragesektoren erfordert eine große Menge CO₂-neutraler Energieträger in Form von Strom sowie Wasserstoff und Wasserstoffderivaten. Hierfür müssen die erneuerbaren Energien, insbesondere Wind und Photovoltaik, möglichst schnell und umfangreich ausgebaut werden. Ebenso sollte der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft schnellstmöglich erfolgen. Dies betrifft sowohl die inländische Wasserstoffherzeugung als auch den Import von Wasserstoff und seinen Derivaten.

Im zukünftigen Energiesystem werden mit Strom und Wasserstoff vor allem Energieträger genutzt, die Netzinfrastrukturen erfordern. Ferner wird die Bedeutung von Fernwärme erheblich zunehmen. Dementsprechend ist ein erheblicher Ausbau der Stromnetze auf Übertragungs- und Verteilnetzebene, der Aufbau einer Wasserstofftransportinfrastruktur sowie der Um- und Ausbau der Wärmenetze erforderlich. Angesichts der Vorlaufzeiten von Infrastrukturmaßnahmen müssen diese Maßnahmen bereits kurzfristig angegangen werden, damit die Infrastrukturen nicht zum Flaschenhals der Energiewende werden. Dabei erfordern die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen des Energiesystems insbesondere im Hinblick auf die Infrastrukturplanungen eine sektorübergreifende Koordinierung, die mit dem Prozess der Systementwicklungsstrategie etabliert wird.

