



8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung – Forschungsmissionen für die Energiewende



Impressum

Herausgeber

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

Stand

Oktober 2023

Diese Publikation wird ausschließlich als Download angeboten.

Gestaltung

PRpetuum GmbH, 80801 München

Bildnachweis

AdobeStock
tonefotografia/Titel
Deemerwha studio/S. 5
vegefox.com/S. 10
cybercomputers.de/S. 18
bilderstoeckchen/S. 26
scharfsinn86/S. 34
kanpisut/S. 41
gerasimov174/S. 48
BMWK/Dominik Butzmann/S. 2

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

Vorwort	2
Zusammenfassung	3
Einleitung	5
Forschungsmissionen für ein klimaneutrales und resilientes Energiesystem	8
Mission Energiesystem 2045	
Wir treiben mit Innovationen den Wandel zu einem klimaneutralen, effizienten und resilienten Energiesystem voran.	10
Mission Wärmewende 2045	
Wir beschleunigen den Wandel zur klimaneutralen und effizienten Wärme- und Kälteversorgung.	18
Mission Stromwende 2045	
Wir schaffen mit Innovationen eine sichere, klimaneutrale und bezahlbare Stromversorgung aus erneuerbaren Energien.	26
Mission Wasserstoff 2030	
Wir ebnen den Weg zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft durch neue Technologielösungen und Konzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette.	34
Mission Transfer	
Wir stärken die Rolle der Energieforschung als Impulsgeber des Fortschritts in Wirtschaft und Gesellschaft – durch Transparenz, Partizipation und Praxisorientierung.	41
Governance und Schnittstellen	48

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

bis spätestens 2045 wollen wir in Deutschland klimaneutral leben und wirtschaften. Das dafür notwendige Energiesystem der Zukunft muss leistungsfähig, widerstandsfähig und effizient sein – und unser Land steckt bereits mitten in dieser Transformation: Das letzte Atomkraftwerk wurde vom Netz genommen, der Ausbau der Erneuerbaren Energien sowie des Stromnetzes kommen voran, Erneuerbare decken derzeit schon über die Hälfte des Strombedarfs. Wohnungen werden künftig klimaneutral beheizt und weniger Energie benötigen. Zudem wird der Einstieg in die Nutzung von Wasserstoff vorbereitet für die Bereiche, in denen es keine sinnvolle Alternative gibt.

Zugleich ist aber klar, dass der vor uns liegende Wandel noch zahlreicher weiterer Schritte und schlauer Lösungen bedarf. Die Nachfrage an technischen und sozialen Innovationen wird daher hoch bleiben. Die Energieforschung nimmt hierbei eine Schlüsselrolle ein: Sie bringt innovative Technologien, Geschäftsmodelle und Verfahren hervor, erprobt sie in der Praxis, optimiert sie im Betrieb und stärkt damit das Vertrauen in neue Lösungen. Damit hilft sie nicht nur dabei, unsere Klimaziele zu erreichen und unsere Wirtschaft wettbewerbsfähig zu halten – sie trägt zusätzlich dazu bei, die Resilienz unseres Energiesystems und unsere Energiesouveränität zu stärken. Erfolgreiche Energieforschung hat damit auch eine sicherheitspolitische Dimension.

Als Element einer gut verzahnten Energie- und Klimapolitik legt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) nun sein 8. Energieforschungsprogramm für die angewandte Energieforschung vor. Mit fünf Missionen richten wir die Förderung der Energieforschung konsequent auf die Beschleunigung der Energiewende und die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung aus.



Das Programm gibt die Leitlinien und Prioritäten für die Förderung der Energieforschung des BMWK in den kommenden Jahren vor und richtet den Fokus dabei auf die schnellere Nutzung der Forschungsergebnisse in der Praxis. Unsere Unterstützung für die Energieforschung stärkt den exzellenten Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort Deutschlands, positioniert deutsche Unternehmen im internationalen Wettbewerb und sichert nachhaltige Wertschöpfung, Wohlstand und die Schaffung zukunftsfähiger, qualifizierter Arbeitsplätze.

In die Ausgestaltung des neuen Programms haben Fachleute aus Forschung, Wirtschaft und Gesellschaft ihre Expertise eingebracht. Das in Industrie, Wissenschaft, Forschung und Gesellschaft vorhandene Know-how wurde so zusammengebracht, um den Herausforderungen unserer Zeit gemeinsam begegnen zu können. Mit dem neuen Programm wollen wir die Forschenden in Wissenschaft und Wirtschaft dabei unterstützen, neue Ideen und innovative Lösungen für die Energiewende zu entwickeln und zu erproben.

In diesem Sinne lade ich Sie, die Energieforscherinnen und Energieforscher, herzlich ein, sich an der Vollendung der Energiewende zu beteiligen: Lassen Sie uns gemeinsam die Zukunft des Energiesystems unseres Landes gestalten!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Robert Habeck', written in a cursive style.

Dr. Robert Habeck

Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz

Zusammenfassung

Die Zeit bis zum Jahr 2045, in dem Deutschland die Klimaneutralität erreichen soll, schreitet schnell voran. Angesichts der immer kürzer werdenden Zeiträume bekommt die Anwendung von Forschungsergebnissen zur Vollendung der Energiewende einen neuen Stellenwert in der Energiepolitik. Mit dem Energieforschungsprogramm legt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) eine neue Strategie zur Förderung der angewandten Forschung für die Energiewende vor und führt einen neuen innovationspolitischen Ansatz ein: Das Programm richtet sich erstmals missionsorientiert und konsequent auf die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung aus, um die Transformation des Energiesystems wirksam zu unterstützen. Ausgehend von fünf Forschungsmissionen werden Programmziele abgeleitet. Sie sind wichtige Meilensteine bei der Umsetzung der Energiewende in den jeweiligen Handlungsfeldern.

Mit dem neuen Programm werden zudem die konkreten Beiträge aufgezeigt, die die angewandte Energieforschung leisten kann, und Förderprioritäten festgelegt. Dafür stehen die spezifischen Ziele in den Programmmissionen. Sogenannte Sprinterziele adressieren dringende Forschungsbedarfe mit besonderer Relevanz für die Energiewende.

Die Fortschritte, die in den verschiedenen Bereichen erreicht werden, werden fortlaufend überprüft. Durch das Monitoring wird frühzeitig deutlich, welche förderpolitischen Maßnahmen Wirkung entfalten, aber auch wo nachgesteuert werden muss. Gleichzeitig erlaubt die Programmsteuerung Nachjustierung bei den Zielen, wenn sich die Rahmenbedingungen ändern. Damit ist das neue Energieforschungsprogramm des BMWK als „lernendes“ Programm angelegt.

Mission Energiesystem

- Programmziel 1** Zielbild und Transformationspfade für das Energiesystem 2045 weiterentwickeln
- Programmziel 2** Gesamteffizienz des Energiesystems verbessern
- Programmziel 3** Resilienz und Versorgungssicherheit im Energiesystem sicherstellen
- Programmziel 4** Nachhaltigkeit im Energiesystem erhöhen
- Programmziel 5** Die Transformation wirtschaftlich und balanciert gestalten

Mission Wärmewende

- Programmziel 1** Wärme- und Kältebedarf in Gebäuden klimaneutral und nachhaltig decken
- Programmziel 2** Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen
- Programmziel 3** Robuste Infrastruktur zum effizienten Verteilen und Speichern von Wärme und Kälte gestalten
- Programmziel 4** Flexibilitätpotenzial des Wärme- und Kältesektors nutzen

Mission Stromwende

- Programmziel 1** Strom aus erneuerbaren Energien effizient und nachhaltig erzeugen
- Programmziel 2** Stabiles Stromnetz für eine zuverlässige Stromversorgung garantieren
- Programmziel 3** Strom effizient nutzen und speichern
- Programmziel 4** Dezentrale Stromerzeuger und -verbraucher effizient vernetzen

Mission Wasserstoff

- Programmziel 1** Grünen Wasserstoff und seine Derivate effizient erzeugen
- Programmziel 2** Resiliente Wasserstoffinfrastruktur entwickeln und erproben
- Programmziel 3** Effizienz bei der flexiblen Rückverstromung von grünem Wasserstoff erhöhen
- Programmziel 4** Industrieprozesse auf effiziente Wasserstofftechnologien umstellen

Mission Transfer

- Programmziel 1** Verfügbarkeit von qualifiziertem Fachpersonal für die Energiewende ausbauen
- Programmziel 2** Innovations- und Portfoliomanagement in der Energieforschung festigen
- Programmziel 3** Agile Prozesse und Formate nutzen
- Programmziel 4** Technologisches Innovationspotenzial erschließen sowie Wertschöpfungsketten erhalten und ausbauen
- Programmziel 5** Akzeptanz und Nachnutzungsmöglichkeiten in der Energieforschung durch Prinzipien der Offenen Wissenschaft steigern

Einleitung

*Die Rolle der Energieforschung
auf dem Weg zur Klimaneutralität*



Im Jahr 2045 soll Deutschland klimaneutral sein. Dafür ist die rasche Vollendung der Energiewende notwendige Voraussetzung. Zugleich ist sie Treiber für erneuerbare Energien, Energie- und Ressourceneffizienz sowie Modernisierung und Digitalisierung des Energiesystems. Auf dem Weg zur Klimaneutralität soll der Anteil erneuerbarer Energie am Stromverbrauch bis 2030 bei 80 Prozent liegen und die Hälfte der Wärmeversorgung klimaneutral erfolgen. Außerdem sollen bis dahin 10 Gigawatt Elektrolyseurleistung für die Produktion von grünem Wasserstoff verfügbar sein.

Die Erschütterungen der energiepolitischen Rahmenbedingungen im Jahr 2022 infolge des russischen Angriffs auf die Ukraine haben deutlich gemacht: Das Energiesystem muss unabhängiger von solchen Entwicklungen werden, um seine Zuverlässigkeit und Widerstandskraft zu erhalten. Ein komplex vernetztes, digitalisiertes Energiesystem muss sorgfältig mit Blick auf Resilienz weiterentwickelt werden, um die Eskalation kritischer Zustände zu vermeiden.

Die Energieforschung nimmt bei der Entwicklung und Verfügbarmachung von Technologieoptionen eine Schlüsselrolle ein. Durch die vorausschauende Forschungsförderung der Bundesregierung, unter Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, sind die heutigen Technologien der Energiewende kontinuierlich weiterentwickelt worden. Durch die technologisch breit aufgestellte Förderpolitik ist ein großes Know-how aufgebaut worden, während weitere Entwicklungsbedarfe zur vollständigen Transformation des Energiesystems hervorgetreten sind.

Forschung und Innovation sind in erster Linie Aufgaben der Unternehmen. Aufgrund der besonderen strategischen Bedeutung des Energiesystems für Wohlstand und Sicherheit unterstützt der Staat diese Bemühungen mit dem Energieforschungsprogramm. Die anwendungsnahe Forschungsförderung des BMWK hilft den Unternehmen bei diesen Aufgaben, bietet ihnen Unterstützung durch Hochschulen und Forschungsinstitute, setzt Anreize für Entwicklungen in Richtung der politischen Zielvorgaben und beschleunigt den Innovationsprozess. Auf dem Weg zum klimaneutralen Energiesystem muss die Energieforschung sicherstellen, dass für alle benötigten Anwendungsfälle klimaneutrale Lösungen zur Verfügung stehen. Die Energieforschung hat außerdem dafür Sorge zu tragen, dass die technologische Transformation des Energiesystems reibungsarm und sicher erfolgen kann. Dabei ist sie dem Anspruch verpflichtet, die Resilienz, Effizienz und Nachhaltigkeit des Energiesystems fortlaufend zu erhöhen.

Das Näherrücken der Zielmarken 2030 und 2045 macht zügiges und wirkungsvolles Handeln erforderlich – sowohl bei der Umsetzung der Energiewende als auch bei der Bearbeitung diesbezüglich drängender Forschungsfragen. Die Forschungsförderung des BMWK soll daher künftig noch stärker fokussiert und zielgerichtet vorgehen und Forschung auf Aspekte der Umsetzung ausrichten, um die Vollendung der Energiewende bedeutsam zu unterstützen. Zu diesem Zweck wird als zentrales Instrument die Projektförderung eingesetzt, die eine flexible Nachjustierung ermöglicht.

Die Wirksamkeit der förder- und forschungspolitischen Maßnahmen ist dabei kontinuierlich nachzuhalten, mit den strategischen Zielen abzugleichen und durch eine effektive Programmsteuerung sicherzustellen.

Das BMWK ist für die Energieforschungspolitik der Bundesregierung federführend zuständig und verantwortet die Projektförderung der angewandten Energieforschung. In der technologieorientierten Forschung entspricht dies dem Technologiereifegrad (TRL) 3 bis 9, während im nicht-technischen Bereich geeignete Kennzahlen wie der Innovationsreifegrad (IRL) herangezogen werden. Die Förderung richtet sich an Unternehmen und Forschungseinrichtungen, die im vorwettbewerblichen Bereich für einen begrenzten Zeitraum an einer inhaltlich definierten Forschungsaufgabe arbeiten. Dabei findet meist eine Zusammenarbeit in einem Forschungsverbund statt. Ergebnisse der Projekte werden nach dem Förderzeitraum durch die Unternehmen an den Markt herangeführt und fließen auch in den zeitgleich ablaufenden FuE-Prozess der nachfolgenden Technologiegenerationen ein. Auf diese Weise tragen die laufenden Projekte des Energieforschungsprogramms zum Erreichen der Zielmarken 2030 bei. Neue Projekte sorgen dafür, dass die bis 2045 benötigte Innovationsdynamik in der Energieforschung dauerhaft erhalten und verstärkt wird.

Als Federführer in der Energieforschungspolitik erstellt das BMWK in Abstimmung mit weiteren Ressorts die forschungspolitischen Vorgaben für den Forschungsbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Großforschungszentren (HGF) und vertritt Deutschland in internationalen und europäischen Gremien der Forschungs- und Innovationspolitik im Energiebereich.

Mit dem neuen Forschungsprogramm für die Energiewende verfolgt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz einen missionsorientierten Ansatz: In fünf Missionen sind konkrete Forschungsziele formuliert, deren Erreichung Förderprioritäten darstellen, um messbar zum klimaneutralen und widerstandsfähigen Energiesystem beizutragen. In dem lernenden Programm wird zudem ein Monitoring etabliert, das frühzeitig anzeigt, wenn Ziele fortzuschreiben beziehungsweise Maßnahmen anzupassen sind. Schwerpunkte des neuen Energieforschungsprogramms sind

- die Forschung für ein resilientes und effizientes Energiesystem (Mission Energiesystem),
- die klimaneutrale Wärme- und Kälteversorgung (Mission Wärmewende),
- die Umstellung der Stromversorgung auf erneuerbare Energien (Mission Stromwende),
- eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft (Mission Wasserstoff) und
- ein schneller Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis (Mission Transfer).

Das vorliegende Programm löst das 7. Energieforschungsprogramm im Bereich der angewandten Energieforschung des BMWK mit der Veröffentlichung einer Förderbekanntmachung beziehungsweise Förderrichtlinie im Bundesanzeiger ab. Dort werden Fördermodalitäten und Rechtsgrundlagen gesondert bekanntgegeben. Darüber hinaus werden gezielte Anreize für notwendige Entwicklungen mit besonderer Relevanz für die Energiewende durch Calls gesetzt.

Forschungsmissionen für ein klimaneutrales und resilientes Energiesystem

Die Energieforschungspolitik ist ein strategisches Instrument der Energiepolitik. Eine breit aufgestellte und zielgerichtete Forschungs- und Innovationsförderung unterstützt das Erreichen der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung. Das gelingt, indem die dafür notwendigen technologischen und methodischen Entwicklungen anwendungsnah vorangetrieben, für die breite Anwendung vorbereitet und in der Praxis erprobt werden. Damit ist das vorliegende Energieforschungsprogramm des BMWK auf die große gesellschaftliche Herausforderung ausgerichtet, bis zum Jahr 2045 ein klimaneutrales Energiesystem zu schaffen. Ab diesem Jahr muss ein Gleichgewicht herrschen zwischen den Treibhausgas-Emissionen, die in Deutschland ausgestoßen werden, und deren Kompensation. Auf dem Weg dorthin bildet das Jahr 2030 eine wichtige Zwischenetappe. Ab dann soll bereits die Hälfte der Wärme- und Kälteversorgung klimaneutral erfolgen und 80 Prozent des Stroms durch CO₂-neutrale Energieträger und -quellen erzeugt werden.

Die **Forschungsmissionen** des Energieforschungsprogramms richten sich an den energiepolitischen Zielen der Bundesregierung für das Energiesystem, den Wärme- und Stromsektor sowie den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft aus. Darüber hinaus wird der Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis als Hebel zur Beschleunigung und Verbreitung von Innovationen zentral und verstärkt adressiert. Die missionsorientierte Ausrichtung des Programms ist dabei eine konsequente Weiterentwicklung der Forschungsförderung und der bislang errungenen Fortschritte für die Energiewende.

Die Energiewende hat eine komplexe, nicht immer vorhersehbare Dynamik. So ist beispielsweise der Anteil erneuerbarer Energie an der Stromversorgung schneller gewachsen als zunächst angenommen. Gleichzeitig kommt die Wärmewende langsamer in Fahrt, obwohl viele Technologien verfügbar sind. Hierfür können auch die strukturellen Unterschiede der Sektoren verantwortlich zeichnen. Zudem ist das Energiesystem unweigerlich äußeren Einflüssen ausgesetzt. Aufgabe einer vorausschauenden Forschungsförderung ist es, vielversprechende Technologiepfade aufzuzeigen und die nötigen Technologieentwicklungen zu beschleunigen, aber auch die Schnittstellen zu angrenzenden Förder- und Politikbereichen im Blick zu halten und zu koordinieren.

Um die Energiewende in den verschiedenen Sektoren voranzubringen, adressieren die Forschungsmissionen die jeweiligen Hebelpunkte mit konkreten **Programmzielen**. Die Transformationsaufgabe ist jedoch komplex und multidimensional. Die Energieforschung ist eine notwendige Voraussetzung, denn sie liefert die Basis, auf der weitere Maßnahmen mit Breitenwirkung (unter anderem Regulatorik und Ordnungspolitik sowie Markt- und Investitionsanreize) aufbauen können. Welche **konkreten Beiträge** die Forschung leisten kann, benennen dabei die **spezifischen Ziele**, die jedem Programmziel zugeordnet sind.

Um die Fortschritte bei der Zielerreichung zu überprüfen, sieht das Programm ein **kontinuierliches Monitoring** vor. Damit die Forschungsförderung flexibel auf Resultate sowie neue Entwicklungen reagieren kann, ist das vorliegende Energieforschungsprogramm als **lernendes Programm** konzipiert. Das bedeutet, dass die Programmsteuerung gezielt nachjustieren kann, wenn dies erforderlich ist. Das stellt sicher, dass die Forschungsförderung stets sowohl zu den energie- und klimapolitischen Zielen der Bundesregierung als auch zu den Marktgegebenheiten, gesellschaftlichen Anforderungen und notwendigen technischen Entwicklungsbedarfen passt.

Um besonders dringende Forschungsbedarfe der verschiedenen Missionen hervorzuheben, sind **Sprinterziele** aufgeführt, die ebenfalls fortlaufend überprüft und nachgesteuert werden.

Energiesystem 2045



Wir treiben mit Innovationen den Wandel zu einem klimaneutralen, effizienten und resilienten Energiesystem voran.

Mit der zunehmenden Elektrifizierung in den Verbrauchssektoren steigt der Anspruch, jede erneuerbar erzeugte Kilowattstunde Strom noch effizienter zu nutzen und dazu die Sektoren miteinander zu koppeln. Im zukünftigen Energiesystem kommt daher der Stabilität der Stromnetze und deren Betrieb eine deutlich ansteigende Bedeutung zu. Grüner Wasserstoff, der mit erneuerbaren Energien erzeugt wird, spielt dabei zukünftig als Energieträger eine wichtige Rolle. Die Energieforschung legt für all diese Lösungsansätze wichtige Grundlagen und überprüft das Zusammenwirken der neuen Technologien in Demonstrations- und Modellprojekten, unter anderem in Reallaboren der Energiewende.

Die Stärke der deutschen Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft hängt auch von der Zuverlässigkeit und der flächendeckenden Versorgungssicherheit des Energiesystems ab. Diese im Rahmen der Energiewende und angesichts der energiepolitischen Verschiebungen in Europa zu erhalten, soll durch das Diversifizieren der eingesetzten Energietechnologien, -quellen und -träger gelingen. Eine höhere Technologiesouveränität ist daher ein zentrales strategisches Ziel, damit das zum Umbau und zum sicheren Betrieb des Energiesystems Benötigte stets zur Verfügung steht. Diesen neuen Herausforderungen soll die Energieforschung sich verstärkt widmen.

Forschung trägt nicht nur zum Erreichen der energiepolitischen Ziele bei, sie liefert auch Grundlagen für das Erarbeiten politischer Leitlinien für die Zukunft. Das gilt besonders für ein so komplexes Gefüge wie das Energiesystem. Demnach ergänzt dieses Energieforschungsprogramm die Entwicklung von systemischen und technologischen Innovationen um die Forschung zu systemanalytischen und gesellschaftlichen Fragen, Prognosen und Entwicklungsszenarien.

Das klimaneutrale Energiesystem in Deutschland wird geprägt sein von erneuerbaren dezentralen Erzeugern und der Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. Im Vergleich zum von fossilen Energieträgern dominierten System stellt dies einen Paradigmenwechsel dar. Der Wandel ist bereits eingeleitet durch den stetig steigenden Anteil erneuerbarer Energien. Für ein zukünftiges Energiesystem sind daher Sektorkopplung, Flexibilisierung, Diversifizierung von Energieträgern und Technologien zur Steigerung der Resilienz, die Digitalisierung der Infrastruktur, Energieeffizienz und neue Geschäftsmodelle essenziell.

Programmziel 1 Zielbild und Transformationspfade für das Energiesystem 2045 weiterent- wickeln

Mit dem Voranschreiten der Zeit und den politischen Entwicklungen verengen sich die Optionen, um bis zum Jahr 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Deshalb müssen mögliche Transformationspfade aus unterschiedlichen Perspektiven beleuchtet werden. Dies geschieht unter anderem mit den „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“ des BMWK. Daraus entstehen Erkenntnisse über Auswirkungen unterschiedlicher Transformationspfade für das Energiesystem 2045.

Die Energiewende ist ein Gesellschaftsprojekt. Für die breite Akzeptanz und die notwendige Aktivierung aller beteiligten Akteure sind eine konsistente Vision und plausible Pfade auf dem Weg zur Vollendung der Transformation essenziell. Zudem beschleunigt eine klare Zielstellung den wissenschaftlich-technischen Austausch und Fortschritt. Die Forschungsförderung ermöglicht daher auch Projekte, die das benötigte Orientierungswissen generieren, um eine effiziente Transformation des Energiesystems umzusetzen.

1.1 Ein Zielbild für das Energiesystem 2045 weiterentwickeln und aktualisieren

Die Energieforschung ergänzt und aktualisiert das Spektrum von Zielszenarien in Abstimmung mit den Arbeiten zu den Langfristszenarien und der Systementwicklungsstrategie der Energiepolitik des BMWK. Für die Verknüpfungen und Abhängigkeiten im Energiesystem werden innovative Methoden entwickelt und erprobt, Modelle weiterentwickelt, optimiert und validiert, zudem werden Szenarienrechnungen durchgeführt und wissenschaftlich analysiert. Die wissenschaftlichen Grundlagen für die notwendigen politischen Entscheidungen werden so gefestigt und erweitert. Technologieoptionen und Zielkonflikte der Transformation werden bei den Analysen des Gesamtsystems berücksichtigt.

1.2 Pfade zum Erreichen des Ziel-Energiesystems konkretisieren und bewerten

Das Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden, die zu untersuchen und zu bewerten sind. Dabei ist das Potenzial neuer Technologien und die wahrscheinliche Dauer bis zur Einsatzreife wichtig. Das Energiesystem in den Jahren der Umbauphase ist in den Blick zu nehmen, um den Übergang effizient und sicher zu gestalten. Für Zwischenstationen, unter anderem das Jahr 2030, werden sinnvolle Indikatoren zur Überprüfung der Zielerreichung bestimmt. Optionen für mögliche Pfadwechsel spielen ebenfalls eine Rolle, die sich beispielsweise durch unerwartete gesellschaftliche oder technische Entwicklungen ergeben könnten.

1.3 Möglichkeiten zur Partizipation im zukünftigen Energiesystem erhöhen

Die breite Anwendung von neuen Technologien sowie innovative Möglichkeiten zur Partizipation sind wichtig für das Gelingen der Transformation des Energiesystems. Forschungsvorhaben sollen diese Wechselwirkungen transdisziplinär analysieren und innovative Lösungsansätze erarbeiten, um die Teilhabe und Mitwirkung zu erhöhen. Dazu wenden Forschende unter anderem Methoden aus der Technikfolgenabschätzung, der Verhaltensökonomie und Akzeptanzuntersuchungen an.

Programmziel 2 Gesamteffizienz des Energiesystems verbessern

Um erneuerbare Energien optimal zu nutzen und die Stabilität der Netze sicherzustellen, ist auch Sektorkopplung notwendig. Zudem können Veränderungen in einem Sektor Auswirkungen auf die anderen Sektoren haben. Beispiele hierfür sind die Elektromobilität und die Elektrifizierung der Wärmeversorgung sowie der geplante Infrastrukturaufbau für die Wasserstoffwirtschaft, die Wechselwirkungen mit den bestehenden Infrastrukturen

für Strom, Gas und Wärme erzeugen. Die Implikationen der Sektorkopplung sind zu erforschen und die Gesamteffizienz des zukünftigen Energiesystems sektorenübergreifend sicherzustellen beziehungsweise zu erhöhen.

2.1 Methoden der sektorenübergreifenden Modellierung und Planung praxisnah weiterentwickeln

Die sektorübergreifende Systemmodellierung und Planung der Strom-, Wasserstoff-, Verkehrs- und Wärmenetze ist geboten, um die Infrastruktur effizient und resilient weiterzuentwickeln und dabei die Bedarfe aller Sektoren zuverlässig abzubilden und zu integrieren. Große Energieverbraucher und Abwärmepotenziale, wie Stahlwerke oder zukünftig Elektrolyseure, sind dabei zu berücksichtigen. Dies erfordert die Modellierung komplexer dynamischer Systeme unterschiedlicher Größenordnungen bei multiplen, teils volatilen Ein- und Auskopplungen von Wärme und Kälte, Elektrizität und Stoffströmen. Auch müssen Methoden und Werkzeuge zur sektorübergreifenden Regelung von Strom-, Wärme-, Wasserstoffnetzen, Erneuerbare-Energie-Anlagen, Großverbrauchern und Speichern entwickelt und in der Praxis zum Beispiel von den Trägern von Planungs- und Steuerungsprozessen validiert werden. Dabei sollen neue oder weiterentwickelte Methoden zur Komplexitätsreduktion sicherstellen, dass die komplexen Analysen praxisgerecht anwendbar sind. Damit die Forschungsergebnisse möglichst breit genutzt werden können, muss die Datenbasis für die Systemmodellierung erweitert, verbessert und nach Möglichkeit offen und mit einheitlichen Formaten und Schnittstellen bereitgestellt werden.

2.2 Sektorübergreifende Erprobung und Validierung umsetzen

Systemische Großprojekte wie die „Reallabore der Energiewende“ leisten zentrale Beiträge zur sektorübergreifenden Erprobung und Validierung der neuen Technologien und Prozesse. Durch die wissenschaftliche Begleitung der Großprojekte werden

die Innovationen und ihre Systemintegration weiter optimiert, das Vertrauen in die Entwicklungen gestärkt und durch Bündelung und übergreifende Ergebnisauswertung sowie gruppenspezifische Aufbereitung der Wissenstransfer beschleunigt. Verstärkt in den Blick zu nehmen ist die Erprobung und Vermessung von Flexibilitätsoptionen wie Power-to-X und sektorübergreifender Systemdienstleistungen, zum Beispiel Erzeugung und Rückverstromung von Wasserstoff, inklusive der digitalen Steuerung zum Zweck der Netzstabilisierung. Dabei sollen auch die Flexibilitätspotenziale von Gebäuden, Quartieren, Elektrofahrzeugen und Industrieprozessen sowie verschiedene Speichertypen inklusive Großbatterien genutzt werden. Ebenfalls sind technische Lösungen für das funktionale Netzengpassmanagement unter Ausnutzung gekoppelter Netze der Sektoren Strom, Gas, Wärme und Verkehr weiterzuentwickeln.

2.3 Digitalisierung vorantreiben

Vom komplexen Planungsprozess über den digitalisierten Betrieb bis hin zum Monitoring und der Qualitätssicherung sind Vertrauen und Sicherheit essenziell, um Abläufe entlang der Wertschöpfungskette schneller und reibungsloser zu gestalten und das Tempo der Energiewende in allen Branchen zu erhöhen. Die Nutzung von Gaia-X als föderiertes Datenökosystem, in dem Daten durch gemeinsame Regeln sowie offene Standards und Schnittstellen verfügbar gemacht und vertrauensvoll zwischen verschiedenen Infrastruktur-Anbietern interoperabel genutzt werden, kann diese wichtige Funktion erfüllen. Die Energieforschung des BMWK wird, wo dies sinnvoll ist, die Nutzung des Gaia-X Trust-Frameworks für Use Cases und Anwendungen im Energiebereich unterstützen.

Programmziel 3 Resilienz und Versorgungssicherheit im Energiesystem sicherstellen

Die Versorgungssicherheit muss auch in einem dezentralen Energiesystem gewährleistet werden, das weitestgehend auf erneuerbaren Energien basiert. Dabei ist der Begriff der Versorgungssicherheit umfassend zu verstehen. Er erstreckt sich über das Bereitstellen von Energie hinaus auf das Mindern von Abhängigkeiten bei Technologie-, Rohstoff- und Energieimporten sowie Lieferketten. Auch geopolitische Rahmenbedingungen haben Auswirkungen. Daher soll sich das zukünftige Energiesystem schnell und verlässlich etwaigen Veränderungen der äußeren Rahmenbedingungen anpassen können. Es soll also seine Resilienz erhöhen. Ein Mittel dafür ist die Diversifizierung von Technologien. Zusätzlich sind bestehende Systemchwächen zu identifizieren und zu beseitigen. Beim Design neuer Technologien und Verfahren sind Schwachstellen, die systemische Auswirkungen haben können, zu vermeiden. Neben den Vorteilen, die sich aus der Digitalisierung und der immer engeren Vernetzung von Komponenten und Anlagen ergeben, entstehen auch Nachteile, die von der Energieforschung zu berücksichtigen sind und durch technische Lösungen adressiert werden sollen. Effizienzverluste und Mehrkosten aufgrund von Resilienzmaßnahmen sind dabei abzuwägen.

3.1 Die Energieversorgung diversifizieren

Die Resilienz kann unter anderem durch das strategische Diversifizieren der Energieversorgung erhöht werden. Die Forschung soll Beiträge zur strategischen Bewertung verschiedener Energiequellen, -träger und -speicher liefern, indem die Rollen von Wind, Photovoltaik, Geothermie, biogenen Energieträgern sowie Wasserstoff und dessen Derivaten untersucht werden. Insbesondere der Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -rückverstromung kommt für das Last- und Netzengpassmanagement, die Systemstabilität sowie als Reserve zukünftig besondere Bedeutung zu. Ein

breites Portfolio an flexibel nutzbaren Technologien, eine zuverlässige Sektorkopplung und weitere Lösungen für Systemdienstleistungen werden ebenfalls benötigt. Dies schließt auch die Kapazitätserweiterung und Flexibilitätserhöhung von Strom-, Wärme- und Wasserstoffinfrastruktur ein. Auch die weiteren Wandlungspfade bis hin zur Endenergie sind zu diversifizieren.

3.2 Vulnerabilitäten des Energiesystems identifizieren und reduzieren

Mithilfe von Szenarioanalysen sollen Vulnerabilitäten im Energiesystem aufgedeckt werden, die die Resilienz des Energiesystems gefährden. Dazu gehören beispielsweise weit verbreitete Software-Produkte zur Steuerung von Anlagen der Energieversorgung und -nutzung, Knotenpunkte in Netzen, große zentrale Anlagen und fehlende oder nicht ausreichend wirksame Sicherheitsmaßnahmen. Auch für das Energiesystem während der Transformation und für das Zielsystem sollen (pfadabhängige) Schwachstellenanalysen erfolgen, auf deren Basis Gegenmaßnahmen entwickelt und Entwurfsprinzipien abgeleitet werden. Dies schließt auch die Simulation der Auswirkungen möglicher Störungen des Energiesystems ein, um das Potenzial zur Replikation und Fehlerausbreitung einschließlich möglicher Resonanzphänomene aufzuzeigen und Lösungsoptionen zu entwickeln.

3.3 Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen reduzieren, Technologiesouveränität stärken

Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit mithilfe der erneuerbaren Energien sind die dafür benötigten Technologien hinsichtlich der Kritikalität der verwendeten Rohstoffe, Komponenten und Zulieferteile zu bewerten. Hierbei können Analysen der Lieferanten und Herkunftsländer wertvolle Informationen zum Status quo liefern. Darauf basierend lassen sich mögliche technologische Optionen ableiten, um Abhängigkeiten zu substituieren oder zu mindern. Das kann beispielsweise durch das Erhöhen der Fertigungstiefe bei kritischen Technologien in Deutschland und der Euro-

päischen Union, durch das Automatisieren und Hochskalieren der Produktion, durch Konzepte des zirkulären Wirtschaftens oder durch Steigern des stofflichen Recyclings gelingen.

Um die Technologiesouveränität im Energiebereich zu flankieren, sind in Projekten und begleitenden Maßnahmen Aspekte der Fachkräftesicherung und des wissenschaftlichen Nachwuchses zu adressieren. Fachlich qualifizierte Menschen multiplizieren Ergebnisse und tragen diese in die Gesellschaft. Sie sollen in der Wissenschaft weiterforschen, langfristig als Fachkräfte in Unternehmen Technologielösungen entwickeln und betreiben oder im Handwerk aufbauen, warten und reparieren.

3.4 Technologien zur Krisenverhinderung, -vorsorge und -bewältigung entwickeln

Um die Resilienz und Krisenvorsorge in den Fokus der Energieforschung zu rücken, soll diese Ausrichtung nun in allen Bereichen gestärkt werden. Technologien und Verfahren sind zu entwickeln, um kritische Zustände des Energiesystems zu vermeiden oder deren Auswirkungen abzumildern. Dazu gehören zum Beispiel Verfahren der Energiemeteorologie und der künstlichen Intelligenz zur Vorhersage von Leistungsgradienten in Netzen. Auch gegen die Folgen von Extremwetterereignissen, Terroranschläge und digitaltechnische Schadensszenarien ist das Energiesystem abzusichern. Vorsorge beinhaltet zudem das Entwickeln und Prüfen von Qualitätsmerkmalen und Standards, beispielsweise bei Cyber- und Datensicherheit, der Zuverlässigkeit beziehungsweise Ausfallsicherheit von Komponenten sowie der Update- und Ersatzteil-Verfügbarkeit. Darüber hinaus müssen, für den Fall des Eintritts von negativen Ereignissen, Technologien für den Netz- und den Versorgungswiederaufbau sektorengestützter Infrastrukturen sowie die Notstrom- und Wärme-Vorsorge, insbesondere für kritische Infrastrukturen, weiterentwickelt werden.

Programmziel 4 Nachhaltigkeit im Energiesystem erhöhen

Nachhaltigkeit ist neben Effizienz und Resilienz eine der zentralen Anforderungen im zukünftigen Energiesystem. Die Betrachtung im Energieforschungsprogramm erstreckt sich dabei über den Horizont der Energieinfrastrukturen hinaus auf den Ressourcenverbrauch aller Wirtschaftsgüter, soweit dieser in den Verarbeitungsschritten und in der Nutzungsphase mit Energieflüssen verknüpft ist. Im nachhaltigen Energiesystem werden die Treibhausgas-Emissionen und Umwelteinflüsse von Technologien und Produkten über deren gesamten Lebenszyklus sowie die Rezyklierbarkeit der verwendeten Stoffe berücksichtigt. Ziel der Energieforschung ist es, insbesondere die CO₂-Emissionen und weitere schädliche Umweltauswirkungen bei Herstellung, Nutzung sowie Aufarbeitung, Entsorgung oder Rückbau von Anlagen und Produkten zu minimieren. Dazu zählt das deutliche Absenken des Primärrohstoffverbrauchs, die Etablierung der Kreislaufwirtschaft sowie innovatives Produktdesign, das den Energieaufwand auch jenseits der Betriebsphase über den gesamten Lebenszyklus im Blick hat, einschließlich der Nachnutzung, des einfachen und zuverlässigen Betriebs sowie einer langen Lebensdauer. Forschungsunterstützte Normungsempfehlungen, beispielsweise zu Schnittstellen, können die Marktdurchdringung der innovativen Produkte beschleunigen.

4.1 Übergang von der linearen zur zirkulären Wirtschaft voranbringen

Der effiziente und nachhaltige Einsatz von Materialien soll durch kreislaufförmige Nutzungspfade sichergestellt werden. Insbesondere für Rohstoffe, die stark nachgefragt sind oder deren Bezug mit politischen Risiken, hohen Energie- und Ressourcenverbräuchen und Umweltschäden einhergeht, soll der Übergang vom linearen zum zirkulären Wirtschaften beschleunigt werden. Dafür sollen Konzepte für Zweitnutzung und Aufarbeitung erarbeitet und die Recyclingfähigkeit verbessert

werden, beginnend bei Produktdesign und Produktdatenbanken bis zur Trenn- und Entsorgungstechnik. Beim Produktionshochlauf von Energie- und Dekarbonisierungstechnologien, zum Beispiel Batterien, sollen auch nachhaltige Stoffkreisläufe mitkonzipiert werden. Technologien, Konzepte und Geschäftsmodelle der zirkulären Wirtschaft sollen erprobt werden. Zu den Konzepten zählen neben dem *Recycling* auch *Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recover* und *Upgradeability*.

4.2 Nachhaltige Produktionsprozesse aufbauen

Nachhaltigkeit im Primärenergieverbrauch wird erreicht, indem die Perspektive der Energieeffizienz von dem direkten Energieverbrauch während der Nutzung einzelner Güter geweitet wird auf den indirekten Verbrauch im Gesamtsystem, der für die Herstellung und die Entsorgung anfällt. Die Minimierung dieser sogenannten „grauen“ Energie geht einher mit der Reduktion der Treibhausgasemissionen über die gesamte Wertschöpfungskette. Ansätze bestehen nicht nur bei der Weiterentwicklung von Produktionsprozessen, welche die während der Herstellung benötigte Energie effizienter einsetzen. Innovative Produkte und dazu passende Herstellungsverfahren sollen entwickelt werden mit dem Ziel, den Gesamtbedarf an energieintensiven Primärrohstoffen zu reduzieren, indem alternative oder recycelte Rohstoffe eingesetzt und die Nutzungsdauern verlängert werden.

Die Maßnahmen tragen mittelbar zu weiteren globalen Nachhaltigkeitszielen bei, etwa indem die Umweltverträglichkeit der Produktion verbessert wird oder Wasserbedarf, Schadstoffausstoß und Flächenverbrauch reduziert werden.

4.3 Nachhaltigkeitsstandards auf pränormative Forschung stützen

Für den Erhalt der internationalen Wettbewerbsfähigkeit ist es essenziell, Nachhaltigkeitsstandards mitzugestalten. Vorwettbewerbliche und pränormative Energieforschung soll daher dazu beitragen,

marktprägende Standards vorzubereiten. Dabei können neu ausgearbeitete nationale Standards zu EU-Standards (CENELEC) und dann zu globalen ISO-Standards weiterentwickelt werden. Für den Bereich des zirkulären Wirtschaftens, den EU Green Deal und als Beitrag zum Klimaschutzgesetz der Bundesregierung haben Unternehmen, Verbände und Wissenschaft gemeinsam mit den Normungsgremien DIN, DKE und VDI eine „Normungsroadmap Circular Economy“ erarbeitet und verabschiedet. Der Erstellungsprozess dieser umfassenden, neuen Normenreihe soll 2023 beginnen.

Programmziel 5 Die Transformation wirtschaftlich und balanciert gestalten

Die Transformation des Energiesystems soll zum Standortvorteil werden. Es ergeben sich Chancen, den Wirtschaftsstandort durch Technologieführerschaft und -export zu stärken. Durch die Forschungsförderung im Rahmen des Energieforschungsprogramms können die technologischen Innovationen weiterentwickelt werden.

Die Herausforderungen der Energiewende liegen unter anderem darin, die Kosten für die neuen Technologien zu reduzieren, damit die Energieversorgung bezahlbar bleibt. Forschungsvorhaben tragen mit ihren Innovationen dazu bei, Kosten zu senken. Vorübergehendem Nachfrageüberhang nach erneuerbaren Energiequellen wird auch durch Effizienzmaßnahmen begegnet, um Spitzenlastsituationen mit hohen Grenzkosten zu vermeiden. Dies reduziert zudem dauerhaft die leistungsabhängigen Kosten im Energiesystem. Die Energiesystemanalyse kann Impulse für das Ausgestalten von Energiemärkten und volkswirtschaftlichen Rahmenbedingungen liefern.

5.1 Effizienz steigern und Kosten reduzieren

In allen Verbrauchssektoren sollen Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs die nachgefragten Momentanleistungen weiter absenken. Technologische Weiterentwicklungen zur Flexibilisierung der Energieverbräuche sollen zur Reduzierung der Energiekosten beitragen. Durch Forschung im Bereich der automatisierten Produktion und deren Hochskalierung soll die Kosteneffizienz der neuen Technologien gesteigert werden, ebenso durch Rückgriff auf günstigere Materialien sowie höhere Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Komponenten.

5.2 Innovative Geschäftsmodelle und Energiegemeinschaften unterstützen

Im Rahmen von Forschungsvorhaben können die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle unterstützt und damit Chancen für Unternehmen aufgezeigt werden. Auch soziale Innovationen wie zum Beispiel Energiegemeinschaften sollen in den Blick genommen werden. Die Energieforschung kann so einen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der Transformation und zur sozialen Ausgewogenheit leisten.

5.3 Den Energiemarkt modellieren

Energiemarktmodelle werden in Zukunft das modellbasierte Entwickeln und Evaluieren von sektorengekoppelten Energiemarkt-Designs ermöglichen. Hierbei spielen zum Beispiel agentenbasierte Ansätze und Wechselwirkungen zwischen Marktverhalten und energiemeteorologischer Prognose sowie die modellbasierte Analyse regulatorischer Rahmenbedingungen eine Rolle.



SPRINTERZIEL

Die **sektorenübergreifende, integrierte Energieinfrastrukturplanung** wird für **alle Regionen Deutschlands bis 2030** beherrscht. Dafür sind validierte Methoden und Instrumente erprobt und verfügbar. Dies berücksichtigt die Netz-, Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speicherplanung für Strom, Wärme und Wasserstoff sowie Anlagen für Power-to-X und Lastmanagement.

MISSION

Wärmewende 2045



Wir beschleunigen den Wandel zur klimaneutralen und effizienten Wärme- und Kälteversorgung.

Über die Hälfte des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Wärme- und Kälteproduktion. Nur ein geringer Teil davon entsteht bislang klimaneutral. Während die Energiewende im Stromsektor vorankommt, sind die Fortschritte im Wärmesektor noch zu langsam. Ziel der Bundesregierung ist es, bis zum Jahr 2045 die Netto-Treibhausgasneutralität zu erreichen und bereits bis 2030 die Hälfte der Wärme klimaneutral zu erzeugen. Um dieses Ziel umzusetzen, ist ein entschlossenes und wirkungsvolles Handeln erforderlich. Dabei schließt die Transformation des Wärmesektors alle relevanten Nutzungsbereiche und Infrastrukturen ein. Fossile Energieträger sind durch erneuerbare Energien und die Nutzung von Abwärme zu ersetzen, Wärme- und Kältebedarfe durch Effizienzmaßnahmen abzusenken, Strom- und Wärmeinfrastrukturen zu koppeln und optimal einzusetzen.

Im Wärme- und Kältesektor sind viele technische Lösungen bereits verfügbar, jedoch können diese noch nicht alle Bedarfe ausreichend abdecken. Forschung und Innovation sind notwendig, um weitere dringend benötigte Technologien zu entwickeln sowie neuartige, noch nicht am Markt etablierte Technologien für den flächendeckenden Einsatz vorzubereiten. Zudem stehen die Systemintegration, Standardisierung und verbreitete Nutzung der neuen Technologien noch aus. Dabei sind sozioökonomische Wechselwirkungen und regionale Besonderheiten zu berücksichtigen.

In der Wärmewende kommt den biogenen Rest- und Abfallstoffen eine besondere Rolle zu: Sie sind dezentral verfügbar, nach entsprechender Behandlung lagerbar und zur Wärmebereitstellung in einem breiten Temperaturbereich flexibel einsetzbar. Allerdings sind biogene Energieträger mengenmäßig limitiert und sollen bevorzugt für solche Anwendungen eingesetzt werden, die weniger Alternativen als der Energie- und Wärmesektor haben, etwa die stoffliche Nutzung. Folglich sind die Prioritäten der Biomassenutzung, die in der Biomassestrategie der Bundesregierung¹ festgelegt werden, auch für die Technologieförderung im Rahmen der Energieforschung maßgeblich und leitend.

1 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/nabis-eckpunktepapier-nationale-biomassestrategie.pdf> [Aktualisierungsvorbehalt]

Programmziel 1 Wärme- und Kältebedarf in Gebäuden klimaneutral und nachhaltig decken

Um Gebäude bis 2045 klimaneutral zu heizen und zu kühlen, sind Effizienzmaßnahmen und der nachhaltige Einsatz erneuerbarer Energien erforderlich.

Wärme und Kälte werden künftig durch verschiedene klimaneutrale Technologien und deren Koppelung bereitgestellt. Die Herausforderung ist dabei, sowohl dicht besiedelte Gebiete als auch den ländlichen Raum bestmöglich zu versorgen.

Zielgruppengerecht und komfortorientiert entwickelte Technologien wirken Vorbehalten entgegen, die durch Veränderungen entstehen. Daneben sind die Akzeptanz der Maßnahmen in der Bevölkerung sowie die unterschiedlichen Bedarfe der Nutzenden in der Forschung zu berücksichtigen.

1.1 Innovative Lösungen hochskalieren

Der verbreitete Einsatz zukünftiger Wärme- und Kältetechnologien soll unterstützt und beschleunigt werden. Dafür sind standardisierte ganzheitliche Lösungen zu entwickeln, die einfach zu dimensionieren und zu kombinieren sind sowie eine breite Passfähigkeit erreichen.

Die Energieforschung entwickelt neue Verfahren für die industrielle Vorproduktion von Sanierungskomponenten und Technikmodulen, wie etwa für Wärmepumpen und neue Dämmstoffe. Um die Kosteneffizienz zu erhöhen und hohe Stückzahlen in den Markt bringen zu können, soll die Produktion hochskaliert und automatisiert werden. Die Ansätze tragen dazu bei, Sanierungsmaßnahmen günstiger und schneller umzusetzen und Engpässe bei Zulieferern und Fachkräften zu reduzieren.

1.2 Komplexität für Planende, Handwerk und Nutzende reduzieren

Die Wärmewende erfordert einfache und schnell umsetzbare Maßnahmen. Die Bauplanung, Auslegung, Installation, Wartung und der Betrieb neuer Anlagen und Komponenten soll vereinfacht werden. Dies soll unter anderem durch digitale Workflows im gesamten Lebenszyklus unterstützt werden. Plug-and-Play-Konzepte können den Personal- und Qualifizierungsbedarf reduzieren. Für den Gebäudebestand werden Methoden entwickelt, die die Gebäudestrukturen automatisiert erfassen, den Heiz- und Dämmbedarf abschätzen und Sanierungsmaßnahmen bewerten. Hierfür müssen Schnittstellen standardisiert und die Systeme benutzerfreundlicher werden.

1.3 Energieeffizienz von der Komponente bis zum Gesamtsystem erhöhen, Qualitätssicherung mitdenken

Die Steigerung der Energieeffizienz bildet eine zentrale Aufgabe: Wärmeverluste in Gebäuden und Wärmenetzen sollen minimiert werden, etwa durch neue Komponenten, Materialien und Dämmstoffe. Das systemische Zusammenwirken der Einzelkomponenten ist sowohl zu planen als auch zu erproben. Dies beinhaltet die Wirkung der digitalen Vernetzung der Einzeltechnologien, wie zum Beispiel die Verknüpfung von Wärmespeicher, Wärmepumpe, Kühlsystem und aktiver Gebäudehülle, unterstützt durch ein Energiemanagementsystem im Gebäude oder Quartier. Insbesondere bei zukünftig breit genutzten Technologien wie der Wärmepumpe soll die Energieeffizienz gesteigert werden, sowohl beim Gerät als auch durch die Systemintegration (inklusive Installation und Betrieb). Zudem soll die Qualitätssicherung verbessert werden, wobei die verschiedenen Einsatzbereiche der Technologie in den Blick zu nehmen sind.

1.4 Ressourcen nachhaltig einsetzen

Künftig werden der gesamte Lebenszyklus von Gebäuden sowie von wärme- und kältetechnischen Anlagen bilanziert werden. Hierfür gilt es, Ansätze

und Tools zur Ökobilanzierungs- und Lebenszykluskostenrechnung weiterzuentwickeln und zu etablieren. Die Klimabilanz und Recyclingfähigkeit neuer Materialien, Bauteile und Gebäudeteile ist zu verbessern. Neben der Substituierung von Materialien soll die Lebensdauer der Komponenten erhöht werden. Die Entscheidungsgrundlagen für bauliche Abwägungen, wie zum Beispiel Neubau oder Sanierung, sollen durch datenbasierte Ansätze erweitert werden.

1.5 Akzeptanz und Partizipation verbessern, Verhaltensänderungen betrachten

Für die Wärmewende in Gebäuden bilden unterschiedliche Wärmeerzeuger und die hohe Anzahl der Wärmeabnehmer eine besondere Herausforderung. Neben technischen Lösungen müssen die verschiedenen Perspektiven (Eigentümer, Mieter, Investoren und Kommunen) berücksichtigt werden. Dies umfasst sowohl soziale und ökonomische Fragestellungen als auch Aspekte der Verhaltensänderung, um zum Beispiel Rebound-Effekte zu vermeiden.

Programmziel 2 Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen

Wärmeenergie ist die treibende Kraft für zahlreiche Prozesse in Industrie und Gewerbe. Die gewählten Temperaturen sind dabei in der Regel prozessspezifisch. Die Defossilisierung der Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe erfordert daher ein differenziertes Vorgehen, um Prozesswärme in ausreichendem Maß und verlässlich bereitzustellen.

Die Verringerung des Wärmebedarfs steht dabei an erster Stelle der Optimierungen. Weitere Maßnahmen sind die Umstellung der Wärmebereitstellung auf treibhausgasneutrale Quellen. Hierzu zählen etwa die elektrische Wärmeerzeugung sowie Einkopplung von erneuerbaren Energiequellen und

Abwärme in Verbindung mit Wärmenetzen und Industriewärmepumpen. Verbleibende Wärmebedarfe insbesondere im Hochtemperaturbereich werden durch synthetische Brennstoffe klimaneutral. Für eine Wärmebereitstellung, für die wenig andere Defossilisierungsoptionen vorhanden sind, ist auch die nachhaltige Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe eine Option. In niedrigen bis mittleren Temperaturbereichen sind auch die Potenziale von (konzentrierender) Solarthermie und Geothermie (in Verbindung mit Hochtemperatur-Wärmepumpen) sowie geeignete Wärmespeicher einzubinden.

2.1 Mittel- und Hochtemperaturprozesse defossilisieren

Für Mittel- und Hochtemperaturprozesse sind neben der direktelektrischen Wärmeerzeugung auch Verfahren zur Nutzung biogener und synthetischer Brennstoffe (Wasserstoff oder Derivate) sowie konzentrierender Solarthermie bis zur Einsatzreife weiterzuentwickeln. Dabei sind Rückwirkungen auf Prozessführung, Produkte und Anlagentechnik zu berücksichtigen.

Die Optimierung der Prozessführung unter anderem durch Nutzung beziehungsweise Einkopplung von Abwärme und Wärmespeicherung soll den Gesamtenergiebedarf senken.

2.2 Industrie- und Großwärmepumpen für den Hochlauf vorbereiten

Industrie-Wärmepumpen sollen zukünftig breit eingesetzt werden, um Prozesswärme auf niedrigem Temperaturniveau (unter 200 °C) bereitzustellen. Dafür sollen die Leistungsklassen und mögliche Temperaturhübe erweitert sowie die Effizienz und Nachhaltigkeit verbessert werden. Hierfür ist der Betrieb mit klima- und umweltfreundlichen Kältemitteln obligatorisch.

Ausschlaggebend für die erfolgreiche Integration der Wärmepumpe in das industrielle Umfeld ist die Wirtschaftlichkeit am konkreten Einsatzort. Die

Individualität der Industrieprozesse, Wärmequellen und übrigen Infrastrukturen erfordert derzeit eine komplexe Auslegung für den Einzelfall und steht einer raschen Marktdurchdringung entgegen. Daher sollen wissenschaftlich begleitete Demonstrationsprojekte zur Ableitung von generalisierenden Auslegungs- und Betriebskonzepten durchgeführt werden.

Um Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen großflächig einzusetzen, sind kostengünstige Fertigungsverfahren weiterzuentwickeln. Überdies soll die Zuverlässigkeit der Geräte durch innovative Prüf- und Wartungsmethoden weiter verbessert werden.

2.3 Hochtemperatur-Wärmepumpen weiterentwickeln

Die Hochtemperatur-Wärmepumpe soll zukünftig eine zentrale Technologie sein, die Prozesswärme im mittleren Temperaturbereich (ab 200 °C) bereitstellen kann. Die Energieforschung soll dazu beitragen, die nutzbaren Temperaturbereiche auszuweiten, variable Temperaturhübe zu realisieren, die Leistungsklassen zu vergrößern sowie klima- und umweltfreundliche Kältemittel einzusetzen. In Demonstrationsprojekten soll diese Technologie unter industriellen Einsatzbedingungen angewendet und weiterentwickelt werden.

2.4 Effizienz bei thermischen Prozessen und Komponenten steigern

Der Wärme- und Kältebedarf kann durch Effizienzsteigerung verringert werden, etwa durch Modifikation der Prozessführung, energieoptimierte Prozesssteuerung, verringerte Durchlaufzeiten und abgesenkte Temperaturen. Zur Bemessung der möglichen Effizienzsteigerungen wird stets die gesamte Prozesskette einbezogen. Um möglichst große Effizienzpotenziale zu heben, sollen Strategien für die Prozessregelung sowie Wärmekaskadierung und Wärme- und Kältespeicherung weiterentwickelt werden. Zur Optimierung sollen umfangreiche Simulationen der Prozesse, Anlagen

und der umgebenden Wärmenetzinfrastruktur durchgeführt werden. Besonders große Einsparpotenziale bestehen dort, wo durch alternative Produktentwicklung auf energieintensive Materialien verzichtet werden kann oder durch Neuentwicklungen in Prozessen energieintensive Schritte disruptiv substituiert werden können – beispielsweise durch den Einsatz von Katalysatoren oder Membrantechnologien.

Thermische und thermochemische Speicher sollen für den Industriebedarf so weiterentwickelt werden, dass Kosten gesenkt, Wirkungsgrade gesteigert sowie Lade-/Entladevorgänge optimiert werden. Ein Ziel ist die Erweiterung des Spektrums an Speichertemperaturen durch Nutzung neuer Speichermaterialien zur Hochtemperatur-Wärmespeicherung.

2.5 Resilienz und systemdienlichen Betrieb von Industrieprozessen steigern

Industrielle Fertigungsprozesse sind in besonderem Maße von einer sicheren und resilienten Energiezuführung abhängig, um die Produktqualität und die Anlagensicherheit zu gewährleisten. Die Steuerung vernetzter Industrieprozesse erfordert komplexe digitale Methoden. Bei allen Weiterentwicklungen sowie bei Planungs- und Auslegungsmethoden für neugestaltete Industrieprozesse steht mit Blick auf die extern am Standort anliegende Energieversorgung stets die Stabilität des Prozesses und die Zuverlässigkeit des Energieeintrags im Mittelpunkt. Betrachtet werden aber auch Rückwirkungen auf die Systemstabilität der Stromversorgung.

Durch Wärme- oder Kältespeicherung haben Industrieprozesse und ihre (Zwischen-)Produkte das Potenzial zum netzdienlichen Betrieb und Lastmanagement. Ziel der Forschung ist es, derartige Potenziale zu heben und neue Anbieter von Systemdienstleistungen für das Energiesystem zu gewinnen.

Programmziel 3 Robuste Infrastruktur zum effizienten Verteilen und Speichern von Wärme und Kälte gestalten

Das Bereitstellen von Wärme und Kälte erfordert den Transport und die Speicher. Für eine klimaneutrale Wärmeversorgung sind die Transformation der bestehenden Wärmenetze sowie deren Ausbau und Neubau notwendig. Die Wärmenetze müssen der dezentralen und regionalen Struktur der Wärmebereitstellung und des Bedarfs gerecht werden und zugleich Spitzenlasten ermöglichen.

Um die Wärmenetze zu defossilisieren, sollen regenerative Energiequellen eingesetzt und Abwärme – auch in Kombination mit Wärmepumpen – konsequent genutzt werden. Zusätzlich sollen die Netztemperaturen abgesenkt werden. Die saisonale Ungleichverteilung der Energieerträge aus Solarthermie und Photovoltaik stellt die Wärmeversorgung im Winter vor besondere Anforderungen. Die Planung der Wärmeinfrastruktur muss dies berücksichtigen, um Wärmeangebot und -bedarf sowohl kurzfristig als auch saisonal aufeinander abzustimmen. Neue Methoden wie die künstliche Intelligenz können die Netzplanung sowie die Netzregeltechnik unterstützen.

Neue Konzepte benötigen den Funktionsnachweis durch geeignete Demonstrationsvorhaben mit einem wissenschaftlichen Monitoring. Es ist eine besondere Herausforderung, Konzepte aus der Forschung in bestehenden Wärmenetzen umzusetzen: Als teure Infrastrukturen mit langen Investitionszyklen und Amortisationszeiten müssen Wärmenetze, die Forschungsobjekte in Forschungsvorhaben sein sollen, weiterhin zuverlässig betrieben werden.

3.1 Wärmenetze auf regenerative und nachhaltige Wärmequellen umstellen

Um die Wärmebereitstellung zu dekarbonisieren, müssen alle regenerativen Wärmequellen umfassend und nachhaltig genutzt werden. Das sind vor allem Geothermie und Solarthermie, unvermeid-

bare Abwärme, zum Beispiel aus industriellen Prozessen, Rechenzentren oder der Elektrolyse, sowie insbesondere zur Spitzenlastdeckung biogene Rest- und Abfallstoffe. Großwärmepumpen können Abwasser- und Umweltwärme erschließen und bei großem Stromangebot auch netzdienlich betrieben werden. Ergänzend können biogene und synthetische Energieträger in einem defossilisierten Wärmenetz als Reserve dienen und Spitzenlasten abdecken. Bei der Erschließung und Nutzung der erneuerbaren Wärmequellen sind Nachhaltigkeits- und Umweltverträglichkeitsaspekte zu berücksichtigen. Im Zuge der Umstellung der Wärmenetze sind die Anlagenkomponenten hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten, Effizienz und Lebensdauer weiterzuentwickeln und innovative Ansätze zur Wärmegewinnung in den Blick zu nehmen.

3.2 Wärmenetztechnik und -regelung weiterentwickeln

Die Integration unterschiedlicher Wärmequellen in ein Wärmenetz und ein dynamischer Netzbetrieb erfordern es, die Bestandsnetze zu einer neuen Wärmenetz-Generation umzurüsten. Niedertemperaturnetze und kalte Nahwärmenetze sollen aufgebaut werden. Durch das bidirektionale Einspeisen können kalte Netze sowohl Wärme als auch Kälte bereitstellen. Weiterhin sind geeignete kurzfristige und saisonale Wärmespeicher zu integrieren. Dazu bedarf es neuer Rohrsysteme und einer modernen, wartungsarmen und langlebigen Netz-, Mess- und Regelungstechnik auf Basis intelligenter Aktoren, die digital vernetzt sind. Neue Methoden zur Regelung komplexer und dynamischer Wärme- und Kältenetze sind erforderlich.

3.3 Mit innovativen Methoden die Wärme- und Kälteversorgung planen

Um in der kommunalen Wärmeplanung schwankende Wärmeangebote und -bedarfe regional wie auch zeitlich durch die Netze ausgleichbar zu halten, braucht es geeignete Planungswerkzeuge. Diese berücksichtigen regionale Gegebenheiten und integrieren bei der langfristigen Zielnetzpla-

nung und -weiterentwicklung auch Möglichkeiten zur Veränderung der Betriebsparameter, zum Beispiel sich ändernde Netztemperaturen, Wärmebedarfe und Einspeisemengen. Voraussetzung dafür ist das großflächige und genaue Erfassen der Gebäudeinfrastruktur in Bezug auf Wärmebedarf und Sanierungszustand. Dafür sind einheitliche Datenformate und Schnittstellen erforderlich, auch für die Diagnose- und die Wartungsplanung.

Für die Entwicklung von praktisch handhabbaren und breit anwendbaren Planungstools, insbesondere um die kommunale Wärmeplanung zu flankieren, soll die vorhandene Expertise gestärkt werden. Daher soll durch die obligatorische Einbindung kommunaler Akteure und Akteurinnen der Wissens- und Praxistransfer sichergestellt und beschleunigt werden. Die Verfahren der kommunalen Wärmeplanung sind bei der Weiterentwicklung der Werkzeuge zu berücksichtigen und wissenschaftlich zu begleiten.

An Standorten von Industrie und Gewerbe erfordert die konsequente Nutzung von Abwärme komplexe Verknüpfungen von Wärmequellen, -senken und -speichern auf mehreren Temperaturniveaus. Schnittstellen dieser industriellen Wärmenetze mit Fernwärmenetzen können die Anwendungsmöglichkeiten erweitern. Die große Zahl an Freiheitsgraden in Verbindung mit den spezifischen Prozessanforderungen erfordern Methoden für eine standortindividuelle Planung und Auslegung, aus denen nachfolgend generalisierende Konzepte abgeleitet werden sollen.

Außerdem braucht es für eine Wärmewende auch eine integrierte Planung und Betriebsführung der dezentralen Wärmeinfrastruktur. Dazu zählen Methoden zur Wärmenetzplanung und zur Standortsuche für beispielsweise Großwärmespeicher. Hierbei gilt es, die Strom- und Wasserstoffinfrastruktur, bisherige und zukünftige Standorte von Großverbrauchern, Abwärmequellen, Erneuerbare-Energie-Anlagen, den Gebäudebestand und räumliche beziehungsweise geologische Gegebenheiten zu berücksichtigen.

3.4 Effiziente großskalige Wärmespeicher entwickeln und optimieren

Das Wärmesystem unterliegt kurzfristigen und saisonalen Schwankungen. Geeignete Wärmespeicher, zum Beispiel Erdbecken, Erdsonden oder Aquiferspeicher, sind systemisch zu integrieren und weiterzuentwickeln. Technologien zur kurz- und langfristigen sowie saisonalen Wärme- und Kältespeicherung sollen weiterentwickelt und erprobt werden – auch um die Sektorkopplung zu unterstützen. Dies schließt Optimierung und Hochskalierung innovativer Speicherkonzepte und -materialien ein, die zum Beispiel Sorption, Phasenwechsel und thermochemische Prozesse nutzen. Darüber hinaus sind passende Betreibermodelle für großskalige Wärme- und Kältespeicher mitzudenken.

3.5 Blaupausen für regionale Wärmeinfrastrukturen bereitstellen

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus der Dezentralität und Diversität regionaler Gegebenheiten. Ländliche Räume sollen erschlossen und Lösungen für heterogene, teils kleinteilige und gewachsene Versorgungsstrukturen und Gebäudebestände gefunden werden. Hier gilt es musterhafte, auf andere Regionen übertragbare Energiekonzepte zu entwickeln.

Programmziel 4 Flexibilitätpotenzial des Wärme- und Kältesektors nutzen

Im Wärme- und Kältesektor können saisonale Unterschiede bei Angebot und Bedarf durch kostengünstige Langzeitspeicherung ausgeglichen werden. Die kurz- und langfristige Energiespeicherung bietet großes Potenzial für einen systemdienlichen Beitrag innerhalb der gesamten Energieversorgung und im Kontext der Sektorkopplung, beispielsweise über Power-to-Heat-Systeme in Verbindung mit Wärmespeichern, netzdienlichen Betrieb von steuerbaren Wärme- und Kälteanlagen

unterschiedlicher Leistungsklassen im Industrie- und Gebäudesektor sowie weitere Systemdienstleistungen zur Stabilisierung des Stromnetzes.

4.1 Wärmequellen diversifizieren

Für ein resilientes und sicheres Energiesystem, aber auch um Abhängigkeiten von einzelnen Energiequellen zu reduzieren, ist ein möglichst breiter Technologiemix sinnvoll. Neben grünem Strom fallen daher Solar- und Geothermie, Wasserstoff und nachhaltige Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe sowie Großspeichern bei der Wärmeversorgung künftig eine strategische Rolle zu. Es gilt, eine möglichst breite Palette an unterschiedlichen Energiequellen zu erschließen und entsprechend ihren Charakteristiken zu verknüpfen.

4.2 Sektorkopplung verbessern

Um die Sektorkopplung zu verbessern, müssen Gas-, Wärme- und Stromversorgungssysteme enger verzahnt werden: So kann etwa Abwärme aus der Elektrolyse in Wärmenetze, Wärmespeicher oder Wärmespeicherkraftwerke eingespeist werden. Wärme- und Kälteanlagen lassen sich netzdienlich betreiben und überschüssiger Strom in Form von Wärme oder Kälte kurzfristig oder saisonal speichern. Neben thermischer Speicherung stellen Lastverschiebung/Demand Side Management und Rückverstromung von Hochtemperaturwärme weitere Möglichkeiten dar, die durch lokale Handelsmechanismen und neue Geschäftsmodelle unterstützt werden können. Die dezentralen Flexibilitätspotenziale von Gebäuden sind hierbei ebenfalls zu nutzen, zum Beispiel durch den flexiblen Betrieb von Wärmepumpen.



SPRINTERZIELE

Bis **2030** werden in Industrieprozessen Hochtemperatur-Wärmepumpen genutzt, die Prozesswärme **über 300 °C** bereitstellen können.

Das Ziel der Erdwärmekampagne² des BMWK, in der mitteltiefen und tiefen Geothermie **bis zum Jahr 2030** ein geothermisches **Potenzial von 10 TWh zu erschließen**, wird von der Energieforschung durch die Weiterentwicklung insbesondere des Angebotes und der Bewertung von Untergrunddaten und der Entwicklung moderner Explorationstechnik aktiv unterstützt.

Bis **2030** sind jeweils drei Speicherlösungen beziehungsweise -systeme für den Industrie- und den Quartiersbereich im Einsatz, die Überschussenergie (aus EE-Strom, Abwärme oder Solarthermie) so kosteneffizient speichern, dass die entladene Nutzwärme (ggf. in Kombination mit Wärmepumpen) preislich konkurrenzfähig zur Wärmeerzeugung aus Strom oder synthetischen Brennstoffen ist.

Bis **2030** werden neuartige Gebäudedämmstoffe eingesetzt, die über den gesamten Produktlebenszyklus nur noch die **Hälfte des Primärenergieeinsatzes** benötigen, um die gleiche Dämmwirkung wie heutige konventionelle Dämmstoffe zu erreichen.

2 Eckpunkte für eine Erdwärmekampagne Geothermie für die Wärmewende, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/eckpunkte-geothermie.html>

Stromwende 2045



Wir schaffen mit Innovationen eine sichere, klimaneutrale und bezahlbare Stromversorgung aus erneuerbaren Energien.

Bis 2030 soll der Bruttostromverbrauch zu mindestens 80 Prozent aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden – bis 2045 zu 100 Prozent. Bisher wird etwa die Hälfte des Stroms (im Jahr 2022 46 Prozent, für 2023 Tendenz ansteigend) regenerativ erzeugt. Zudem sollen viele Bereiche, wie etwa der Verkehr, Industrieprozesse und das Heizen von Gebäuden, in signifikantem Ausmaß elektrifiziert werden. Auch dafür muss erneuerbar erzeugter Strom bedarfsgerecht, umweltverträglich und bezahlbar zur Verfügung stehen. Energieeffizienz wirkt dem steigenden Bedarf entgegen. Stabile Netze und effiziente Speicher sorgen dafür, dass der Strom witterungsunabhängig an den Stellen und zu den Zeiten vorhanden ist, wenn er gebraucht wird.

Programmziel 1 Strom aus erneuerbaren Energien effizient und nachhaltig erzeugen

Der Ausbau der regenerativen Energieerzeugungsanlagen, insbesondere zur Nutzung von Wind und Sonne, muss für die gesteckten Ziele deutlich beschleunigt und langfristig auf hohem Niveau fortgeführt werden. Dabei soll eine Diversifizierung der Technologien und Energiequellen eine resiliente und damit verlässliche Stromversorgung gewährleisten.

1.1 Effizienz bei der Stromproduktion steigern und Kosten senken

Windenergie- und Photovoltaikanlagen werden in Deutschland auch weiterhin das Rückgrat der Stromerzeugung bilden. Vorrangiges Ziel ist es, durch Forschung und Entwicklung effizientere, leistungsstärkere, zuverlässigere und wartungsärmere Anlagen mit längerer Lebensdauer zu erhalten, um den spezifischen Ressourcen- und Flächenverbrauch sowie die anlagenseitigen Stromkosten zu verringern. Neue, für die Anwendung optimierte Materialien und automatisierte Fertigung von Komponenten und Systemen sowie standardisierte Anlageninstallationen stellen dafür Entwicklungsschwerpunkte dar. Die Innovationen sollen auch den Aufbau von Produktionskapazitäten in Europa begünstigen. Digitale Methoden und neuartige Verfahren der Zustandsüberwachung sollen die Betriebsführung optimieren, die Betriebs- und Wartungskosten der Anlagen senken und die Versorgungssicherheit steigern. Die Verbesserung der Anlagenregelung, zum Beispiel bedarfsorientierte Betriebsmodi, und die Weiterentwicklung der Leistungselektronik sollen ebenfalls zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung beitragen.

Fassadenintegrierte Photovoltaik und andere Formen der integrierten Nutzung können weitere Standorte für die Stromproduktion erschließen. Überdies sind Reserve- und Spitzenlastkraftwerke für den Einsatz von synthetischen oder biogenen Brennstoffen und hinsichtlich der Effizienz und Investitionskosten weiterzuentwickeln.

1.2 Technologien zur Diversifizierung der Stromproduktion weiterentwickeln

Die Diversifizierung der Technologien und Energiequellen bei der Stromproduktion kann maßgeblich zur Erhöhung der Resilienz des Energiesystems beitragen. Um die witterungsabhängige Stromproduktion aus Wind- und Solarenergie zu ergänzen, können synthetische oder biogene Brennstoffe in flexiblen Kraftwerken verschiedener Leistungsklassen genutzt werden, insbesondere auch mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Außerdem sollen Hybridansätze, bei denen mehrere erneuerbare Energiequellen und Speichertechnologien kombiniert werden, erforscht werden. Des Weiteren kann durch energetische Nutzung von Rest- und Abfallstoffen elektrische Energie flexibel bereitgestellt werden. Mit Hilfe innovativer CO₂-Technologien kann das aus der Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid abgetrennt, aufbereitet und weiterverwertet werden. Auch andere Wärmequellen können für die Stromerzeugung unter dem Aspekt der Diversifizierung oder Spitzenlastabdeckung sinnvoll sein, zum Beispiel Wärmespeicherkraftwerke, solarthermische Kraftwerke, Geothermie oder Abwärmennutzung. Bei der Entwicklung von Lösungsansätzen zur Diversifizierung der Stromproduktion sind die systemdienlichen Eigenschaften der Technologieoptionen, sowohl für Großkraftwerke als auch dezentrale Anlagen, sowie Aspekte der Resilienz und Versorgungssicherheit besonders in den Blick zu nehmen.

1.3 Nachhaltigkeit und Akzeptanz für Erneuerbare-Energie-Anlagen verbessern

Für die erfolgreiche Umsetzung der Stromwende ist eine ausreichende gesellschaftliche Akzeptanz notwendig. Dafür und mit Blick auf eine umwelt- und ressourcenschonende Energiepolitik, die international eine Vorbildfunktion einnehmen kann, ist Nachhaltigkeit bei der Entwicklung und Optimierung von Technologien ein wichtiger Aspekt. Daher ist für innovative Technologieoptionen auch die Umweltverträglichkeit zu steigern, beispielsweise durch umweltschonende Installationsverfahren,

Integration von Tierschutzvorrichtungen oder Lärminderung. Auch geht es darum, Nutzungskonkurrenzen zu entschärfen, den spezifischen Flächenverbrauch zu minimieren und neue Standortoptionen zu erschließen.

Auf Technologieebene ist über den gesamten Lebenszyklus hinweg ein hohes Maß an Nachhaltigkeit anzustreben. Dies betrifft nicht nur das Verringern der CO₂-Emissionen bei Produktion, Betrieb und Rückbau. Material und Ressourcen sollen über den Lebenszyklus insgesamt möglichst effizient genutzt werden. Dazu gehört auch, Komponenten und Anlagen interoperabel und reparabel zu gestalten und vorausschauend ihre Integration in die Kreislaufwirtschaft mitzuplanen. Überdies gilt es, die Lebensdauer aller Systemkomponenten zu steigern.

Programmziel 2 Stabiles Stromnetz für eine zuverlässige Stromversorgung garantieren

Die Einspeisung zeitlich variabler Strommengen, die dezentral auf den unteren Spannungsebenen anfallen und volatil vom Angebot an Sonnen- und Windenergie abhängen und ein erhöhter Strombedarf durch eine steigende Anzahl von Stromverbrauchern, mögliche Cyberangriffe oder Fehlfunktionen von digitaler Steuerung sowie häufigere Wetterextreme aufgrund des Klimawandels: Das Stromnetz soll den wachsenden Anforderungen gerecht werden und weiterhin auf höchstem Niveau Versorgungssicherheit und Systemstabilität sicherstellen. Neben dem notwendigen Netzausbau können die Steuerung flexibler Stromverbraucher und die vermehrte Nutzung von lastseitiger Flexibilität zur Netzentlastung beitragen, aber zugleich die Komplexität des Netzbetriebs erhöhen. Für diese vielfältigen Herausforderungen soll die Energieforschung zuverlässige Lösungen finden und erproben.

2.1 Systemdienstleistungen durch erneuerbare Energien und Verbraucher bereitstellen

In einem defossilisierten Energiesystem sind auch die Systemdienstleistungen im Stromnetz klimaneutral zu erbringen. Dazu gehören Momentanreserve und Regelenergie, Netzengpass-Management und Redispatch sowie das Sichern der Spannungsqualität und der Schwarzstartfähigkeit. Konzepte und Technologien sollen erforscht werden, wie Erneuerbare-Energie-Anlagen, Stromspeicher und flexible Verbraucher, sowie neue Regelstrategien und Marktmechanismen, die bisher auf fossilen Energieträgern basierende Systemdienstleistungen ersetzen können. Dabei sind auch die notwendigen Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Netz- beziehungsweise Spannungsebenen zu berücksichtigen. Die Bedarfe, Wirkungsweisen und Zuverlässigkeiten der zukünftigen Systemdienstleistungen sind für das klimaneutrale Stromsystem und die Phase der Transformation auf verschiedenen Größenskalen zu untersuchen. Dabei sind auch Prozesse und Kommunikation zwischen den Marktteilnehmern in den Blick zu nehmen.

Die Roadmap Systemstabilität zeigt erstmalig einen Fahrplan zur Erreichung eines sicheren und robusten Systembetriebs mit 100 Prozent erneuerbaren Energien auf. Sie bietet durch Definition der Verfahrensschritte, verantwortlichen Akteure und des Zeitplans eine Orientierung, die von der Energieforschung berücksichtigt werden soll.

2.2 Netzplanung und -betrieb verbessern

Stromnetze müssen vorausschauend geplant und ausgebaut werden. Zur Verbesserung der Netzplanung, d.h. der bedarfsgerechten Dimensionierung von Optimierungs-, Verstärkungs- und Ausbaumaßnahmen, sind innovative Planungstools und Datenanalysemethoden kontinuierlich weiterzuentwickeln. Im Sinne einer integrierten Planung sind neben den Stromnetzen ebenfalls die Wärme- und Wasserstoffnetze sowie flexible Großverbraucher und -speicher zu berücksichtigen.

Um einen höheren Grad der Automatisierung in den Verteil- und Übertragungsnetzen zu erreichen, sind intelligente Steuerungs- und Überwachungssysteme weiterzuentwickeln. Durch geeignete Steuerung der Lastflüsse soll die vorhandene Infrastruktur optimal ausgelastet werden. Konzepte zur kurativen Betriebsführung sowie Regelungskonzepte zum dezentralen Management von Spannung und Blindleistung in Verteilnetzen sind ebenfalls wichtige Ansätze. Außerdem sind die Auswirkungen regulatorischer Maßnahmen, wie beispielsweise im Stromgroßhandel und Regelleistungsmarkt, für den Netzbetrieb und die Planung zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die möglichen Auswirkungen von besonderen Wetterereignissen, Cyberangriffen, technischem Versagen oder menschlichen Fehlern.

2.3 Netzbetriebsmittel weiterentwickeln

Um eine zuverlässige Stromversorgung in einem zunehmend dezentralen und flexiblen System sicherzustellen, sind aktive Betriebsmittel wie zum Beispiel Stromrichter, regelbare Transformatoren oder leistungselektronische Komponenten weiterzuentwickeln. Hierbei sind die netzbildenden Eigenschaften von Stromrichtern besonders in den Blick zu nehmen.

Um Strom über große Distanzen effizient zu übertragen, können zum Beispiel Hochspannungsgleichstrom (HV-DC) und Wechselstrom-Leitungen (HV-AC) eingesetzt werden. Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) kann zudem zur nahezu verlustfreien Übertragung oder in Betriebskomponenten (zum Beispiel Strombegrenzer) genutzt werden.

Programmziel 3 Strom effizient nutzen und speichern

Um trotz des zukünftig ansteigenden Bedarfs an erneuerbarem Strom die Kosten für den Ausbau der Erneuerbare-Energie-Anlagen und der Stromnetze zu begrenzen, ist das regenerative Stromangebot noch effizienter zu nutzen. Hierfür sollen insbesondere auch industrielle Stromverbraucher in den Blick genommen werden. Darüber hinaus sind Stromspeicher ein wesentlicher Baustein, um das Energiesystem zu flexibilisieren. Dabei kann der Strom auch in anderen Energieformen gespeichert werden. Die Speicher ermöglichen einen stabilen Betrieb des Stromnetzes bei einem steigenden Anteil fluktuierender Einspeisung. Haushalte können selbst produzierten Strom zwischenspeichern und bei Bedarf nutzen. In Industriebetrieben können Lastspitzen aufgefangen werden.

3.1 Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe steigern

Neben stromintensiven Verfahren in singulären Großanlagen der industriellen Produktion bilden auch die kontinuierlichen Energieverluste in kleineren, verbreiteten Industrieanlagen und -komponenten große Potenziale für die Reduktion des Industriestromverbrauchs. Produktionsverfahren sollen daher optimiert oder durch effizientere und klimaneutrale Verfahren ersetzt werden, zum Beispiel durch den Übergang zu einer elektrischen Wärmezeugung. Neben elektrisch betriebenen Aggregaten und Anlagen sowie deren Steuerung sind energieeffiziente Verfahren und Prozesse neu- und weiterzuentwickeln, um den Energieverbrauch signifikant zu verringern und die Investitionskosten zu senken. Effizienzkonzepte für Neu- und Bestandsanlagen schließen auch verlustarme Firmennetze und zum Beispiel nahezu widerstandslose Hochtemperatur-Supraleitungen mit ein. Weiterentwicklungen etwa bei Pumpentechnik, Leistungselektronik und der Reibungsoptimierung verringern den Energiebedarf im Industriesektor und beim Verbraucher.

Um den netzdienlichen Betrieb von stromintensiven Prozessen zu ermöglichen und so das Potenzial für Lastmanagement in Deutschland zu erhöhen, soll die Flexibilität der stromverbrauchenden Anlagen in Industrie und Gewerbe verbessert werden. Rückwirkungen auf das Stromnetz werden durch Glättung von Lastspitzen mittels geeigneter Prozessführung und Speichertechnologien minimiert. Dazu sind sowohl kontinuierliche als auch Batchprozesse für den effektiven und effizienten Betrieb in Teillast weiterzuentwickeln. Last- und Energiemanagement-Systeme für Industrieanlagen und ganze Industrieparks werden notwendig sein. Neue Geschäftsmodelle, die zum Beispiel Dienstleistungen im Zusammenhang mit netzdienlicher Stromnutzung anbieten, sollen dabei mitgedacht werden.

3.2 Stromspeichertechnologien weiterentwickeln

Elektrochemische Speicher können vielfältig eingesetzt werden, zum Beispiel in Elektrofahrzeugen, Heimspeichern oder Industrie- und Gewerbebetrieben. Darüber hinaus werden sie in der Energiewirtschaft gebraucht, um Netze zu stabilisieren. Neben den heute schon verbreiteten Lithium-Ionen-Batterien sind Batteriesysteme mit alternativer Zellchemie zu entwickeln, um den Einsatz knapper und teurer Materialien zu reduzieren. Auch sind die Zyklenfestigkeit und die Recyclingfähigkeit der Batteriesysteme zu verbessern, die Kosten zu senken sowie die Schnellladefähigkeit und Speicherkapazität zu erhöhen. Die Forschung zu Batterietechnologien soll durch Redox-Flow-Systeme, Supercaps sowie Schwungmassenspeicher ergänzt werden.

Zum Speichern großer Energiemengen über längere Zeiträume sollen unter anderem Hochtemperaturwärmespeicher und Druckluftspeicher weiter erforscht werden. Zudem ist die Rückverstromung in Speicherkraftwerken zu erproben. Zum großskaligen und flexiblen Speichern elektrischer Energie soll auch die Umwandlung in chemische Energieträger, wie Wasserstoff, in den Blick genommen werden.

Für sämtliche Speichertechnologien sollen möglichst nachhaltige Fertigungsverfahren entwickelt und kritische Rohstoffe vermieden werden. Außerdem müssen die Technologien hochskaliert sowie Lieferketten in den Blick genommen werden. Die Nutzung innovativer großer und hocheffizienter Speichertechnologien im Stromnetz soll demonstriert werden – und den Markteinsatz erleichtern.

Programmziel 4 Dezentrale Stromerzeuger und -verbraucher effizient vernetzen

Zukünftig müssen viele zusätzliche Stromverbraucher und dezentrale Energieerzeugungsanlagen in die Verteilnetze integriert werden. Dabei sind die volatile Stromproduktion und der Verbrauch in Einklang zu bringen. Wesentliche Lösungsaspekte sind die Digitalisierung und die systemdienliche Nutzung flexibler Speicher und Verbrauchsanlagen. Dies erfordert jedoch ein hohes Maß an Interoperabilität und Standardisierung. Perspektivisch können die Stromnetze besser ausgelastet werden, indem Marktanreize für flexible Verbraucher gesetzt werden. Die Energieforschung soll diese vielfältigen Herausforderungen in ihrer ganzen Breite durch Weiterentwicklung und Erprobung relevanter Technologien und deren Systemintegration adressieren.

4.1 Dezentrale Flexibilitätsoptionen durch Regelungskonzepte nutzen

Präzise Modelle sollen die Auswirkungen auf das Energiesystem analysieren, wenn eine große Anzahl dezentraler Anlagen in einem engen Zeitraum in das Stromnetz eingebunden wird. Zum einen sind die technischen Einflüsse von wechselrichterbasierten Anlagen auf die Stabilität der Stromnetze zu untersuchen, Anlagen(typen) mit geeigneten Eigenschaften zu entwickeln und die Praxistauglichkeit nachzuweisen. Zum anderen soll die Integration in die unterschiedlichen Märkte für elektrische Energie sorgfältig gestaltet werden. Dabei sind auch die Auswirkungen verschiedener

Vergütungsmodelle und Preissignale (zum Beispiel variable Netzentgelte), das Wechselspiel aus Markt- und Stromnetzsignalen und Eigenbedarfsoptimierung sowie die Auswirkungen auf den Netzbetrieb einzubeziehen.

Ein weiterer Forschungsaspekt ist es, wie dezentrale Anlagen sowie lokale und regionale Energiemanagementsysteme intelligent zu regeln sind. Dabei spielt die Integration dezentraler Power-to-X-Anlagen (zum Beispiel Wärme-/Kältespeicher und Elektrolyseure) eine besondere Rolle. Aus diesem Grund sind die verschiedenen Energiesparten übergreifend zu betrachten, inklusive der Quartiersplanung und des Industriesektors.

4.2 Sichere und effiziente digitale Kommunikation gewährleisten

Im Zuge der Digitalisierung der Energiewende ist das Smart-Meter-Gateway die Schlüsseltechnologie, um dezentrale Erzeuger und Verbraucher für standardisierte digitale und sichere Ansteuerung und Messdatenauslesung zugänglich zu machen. Darin abgebildete Funktionen müssen kontinuierlich weiterentwickelt werden, um innovative Anwendungen zu ermöglichen und dabei Betriebs- und Datensicherheit zu gewährleisten. Um die Stromversorgung und Cybersicherheit im Regelbetrieb, bei Störungsszenarien und im Fehlerfall sicherzustellen, soll während der Technologieentwicklung insbesondere auch die sorgfältige Analyse und Behebung potenzieller Schwachstellen der Komponenten und ihres Zusammenwirkens im Datennetz durchgeführt werden. Für den effizienten und gesellschaftlich akzeptierten Einsatz der Smart-Meter-Gateways sind die Interoperabilität der Schnittstellen und Protokolle sowie einheitliche Anforderungen an Datensicherheit und Datenschutz maßgeblich und durch pränormative Forschung zu begleiten. Darüber hinaus soll die digitale Kommunikation verschiedener Technologien im gesamten Energiesystem (zum Beispiel von Energiemanagementsystemen für die dezentrale Sektorkopplung) im Rahmen der Energieforschung weiterentwickelt und erprobt werden.

4.3 Neue Geschäftsmodelle entwickeln

Die Teilnahme neuer dezentraler Akteure in einem zunehmend klimaneutralen Energiesystem eröffnet den Raum für innovative und nachhaltige Geschäftsmodelle. Diese sollen durch Ergebnisse der Energieforschung so gestaltet werden, dass das Akteursverhalten auf die Ziele 2045 ausgerichtet ist. Ein wichtiges Geschäftsfeld sind dabei messdatenbasierte Dienstleistungen, die zum Beispiel Energieoptimierung, nutzerorientierte Betriebsanpassungen und Sicherheitservices adressieren. Wenn dezentrale Einspeisungen intelligent und effizient gebündelt werden, können kleine Akteure an Großhandelsmärkten und beim Erbringen von Systemdienstleistungen in marktrelevanten Zeitskalen teilnehmen. Auch sind Geschäftsmodelle im Zusammenhang mit dem Lastmanagement großer Stromverbraucher relevant. Energiemanagement und intelligente Umrichtertechnik ermöglichen es, dass E-Fahrzeuge, Wärmeversorgung und weitere Anlagen optimal zusammenspielen – und bieten Chancen für weitere Dienstleistungen. Für die neuen Geschäftsfelder sind Modelle aufzubauen mit dem Ziel, die gesellschaftlichen Rückkopplungen entsprechend den Auswirkungen auf das Energiesystem 2045 zu gestalten. Dabei sind die regulatorischen Rahmenbedingungen und das Verhalten der Nutzenden zu berücksichtigen.



SPRINTERZIELE

Hochleistungsfähige Generatoren für Windenergieanlagen der **15-MW-Klasse mit höheren Nenndrehzahlen** und möglichst **ohne** den Einsatz **kritischer Rohstoffe** sind **bis 2030** verfügbar.

Der Aufbau einer **vollständigen PV-Wertschöpfungskette** in Deutschland und der EU zur Sicherung der Technologiesouveränität wird in den kommenden **fünf Jahren** durch intensive FuE-Begleitung unterstützt.

In den kommenden **fünf Jahren** wird der **stabile Stromnetzbetrieb** (einschließlich Speichern) in einem defossilisierten Teilsystem (Stromnetz und ggf. in Kombination mit Wärme- und Wasserstoffnetz) **großformatig demonstriert**.

Wasserstoff 2030



Wir ebnen den Weg zur nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft durch neue Technologielösungen und Konzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Grüner Wasserstoff wird eine zunehmend wichtige Rolle im Energiesystem spielen. Mit dem klimaneutralen Energieträger können viele Prozesse defossilisiert werden. Zudem können netzdienlich betriebene Elektrolyseure sowie Wasserstoff-Kraftwerke das Stromnetz stabilisieren. Wasserstoff wird als Speicher- und Transportmedium für erneuerbare Energie eingesetzt und kann sowohl zur Rückverstromung und Wärmeerzeugung als auch stofflich genutzt werden.

Die Bundesregierung will Deutschland zu einem globalen Vorreiter für grünen Wasserstoff machen und so langfristig die Marktführerschaft bei Wasserstofftechnologien erlangen und sichern. Die politischen Vorgaben und Ziele für den Markthochlauf sind in der Nationalen Wasserstoffstrategie beschrieben. Bisher wird das Gas fast ausschließlich aus fossilen Quellen gewonnen und überwiegend in der chemischen Industrie, Raffinerien und der Ammoniakproduktion eingesetzt. Klimaneutral hergestellter grüner Wasserstoff könnte diese Anwendungen kurz- bis mittelfristig defossilisieren. Mit dem Gas und seinen Derivaten können außerdem Bereiche klimafreundlich werden, die sich durch andere erneuerbare Energieträger nur schwer umstellen lassen. Dadurch steigt der Wasserstoffbedarf in Deutschland zukünftig stark an.

Dafür wird eine Wasserstoffwirtschaft aufgebaut, bei der Erzeugung aus erneuerbaren Energien, Infrastruktur für Transport und Speicherung und Abnehmer gleichzeitig mitgedacht werden müssen. Die Energieforschung ist gefragt, mit innovativen Technologien und Konzepten den Weg dafür zu ebnen.

Programmziel 1 Grünen Wasserstoff und seine Derivate effizient erzeugen

Grüner Wasserstoff wird durch Wasserelektrolyse mit erneuerbarem Strom hergestellt. Er kann entweder direkt genutzt oder in weiteren Prozessschritten in andere chemische Stoffe (Derivate) umgewandelt werden. Neben der Wasserelektrolyse gibt es auch vielversprechende und innovative alternative Herstellungsverfahren.

Hocheffiziente und innovative Erzeugungstechnologien für grünen Wasserstoff und seine Derivate sollen weiterentwickelt und für unterschiedliche Einsatzbereiche und Standorte angepasst werden. Dabei ist auch das Exportpotenzial der Technologien mitzudenken. Insbesondere sollen die Kosten für die Wasserstoffherstellung reduziert werden, um die Konkurrenzfähigkeit des grünen Energieträgers zu verbessern.

1.1 Effiziente, ressourcenschonende Elektrolyseure entwickeln und skalieren

Elektrolyseverfahren sollen weiterentwickelt werden, vor allem hinsichtlich Effizienz, Lebensdauer, Leistungsdichte und Teillastfähigkeit der Elektrolyseure. Auch neuartige Elektrolyseverfahren sollen erforscht und zur Marktreife gebracht werden. Dabei sollen verschiedene Einsatzbedingungen berücksichtigt werden, wie Luftfeuchte, Temperaturen, Temperaturschwankungen oder Meerwasser und flexibler Betrieb.

Die Technologieentwicklung soll insbesondere dazu beitragen, knappe Ressourcen einzusparen und kritische Rohstoffe zu substituieren (zum Beispiel Iridium). Überdies soll die Recyclingfähigkeit von Elektrolyseuren und deren Komponenten bereits bei deren Konstruktion und Herstellung eingeplant werden.

Die Kapazität der Elektrolyseure soll hochskaliert und ihre Herstellung automatisiert werden, um die Kostendegression für grünen Wasserstoff zu

verbessern. Innovative Maintenance-Konzepte sollen die Langlebigkeit der Anlagen verbessern und so ebenfalls Kosten sparen. Sicherheitstechnik, Überwachungssysteme und Schutzkonzepte sollen weiterentwickelt werden, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

1.2 Wasserstoffherzeugung systemdienlich integrieren

Elektrolyseure sind große Stromsenken, können aber im flexiblen Teillastbetrieb auch zur Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden, indem sie ein lokales Überangebot an erneuerbarem Strom zur Wasserstoffherstellung verwenden oder sich bei Netzfehlern systemstabilisierend verhalten. Dafür sollen Elektrolysetechnologien so weiterentwickelt werden, dass Wirkungsgrad und Lebensdauer auch bei netzdienlicher Nutzung verbessert werden. Die Gesamteffizienz der Anlagen und die Auswirkung auf den Betrieb des Stromnetzes sollen optimiert werden.

Um die Potenziale der Elektrolyseure für netzdienlichen Betrieb, zur Energiespeicherung sowie als Abwärme- und Wasserstoffquelle bestmöglich auszunutzen, sind neue Verfahren zur Standortplanung zu entwickeln. Dabei sollen auch sicherheitstechnische und ökologische Kriterien beachtet werden, wie die lokale Wasserverfügbarkeit. Die Offshore-Elektrolyse bietet Potenzial, zusätzliche Flächen auf See zu erschließen und Elektrolyse direkt mit Offshore-Windparks zu koppeln.

1.3 Alternative Wasserstoffherzeugungs- verfahren weiterentwickeln

Alternative Verfahren zur grünen Wasserstoffherzeugung sollen weiterentwickelt, optimiert und wirtschaftlich anwendbar werden. Hierzu zählen photokatalytische, photobiologische, solarthermische und solarthermochemische Herstellungsverfahren. Sie wandeln solare Energie ohne Umweg über Strom direkt in Wasserstoff um. Zudem können regional verfügbare Biomasse und biogene Rest- und Abfallstoffe genutzt werden. Alternative

Produktionsverfahren für Wasserstoff und Wasserstoffverbindungen sind eine sinnvolle Ergänzung zu den elektrisch betriebenen Verfahren.

1.4 Produktion von Wasserstoffderivaten effizienter gestalten

Um grüne Wasserstoff-Derivate großtechnisch und wettbewerbsfähig zu produzieren, sollen etablierte Verfahren optimiert und innovative Methoden erforscht werden. Dabei sind die einzelnen Teilprozesse bezüglich der gesamten Prozesskette zu verbessern. Da der Bedarf an chemischen Grundstoffen und Brennstoffen aus grünem Wasserstoff, wie Methan, Methanol und Ammoniak, deutlich anwachsen wird, soll die schnelle industrielle Umsetzbarkeit auch im Blick behalten werden. Im Sinne eines Kohlenstoffkreislaufs soll dabei auch das Auffangen und Nutzen von Kohlendioxid, das in manchen Prozessen ein chemisch unvermeidbares Nebenprodukt ist, berücksichtigt werden.

Programmziel 2 Resiliente Wasserstoffinfrastruktur entwickeln und erproben

Große Verbrauchs- und Erzeugungsschwerpunkte für Wasserstoff benötigen eine leistungsfähige Wasserstoff-Infrastruktur. Diese fügt sich in die bestehenden Infrastrukturen für elektrische Energie und Erdgas ein und nutzt diese teilweise weiter. Dazu lassen sich bestehende Erdgasnetze und -speicher umrüsten und erweitern, wobei auch europäische Strukturen und Importterminals angebunden werden müssen. Neben Pipelines erfolgt der landgebundene Transport auch über Straßen und Schienen. Ein Teil des Wasserstoffs wird in Form von Ammoniak, Methanol oder mit Hilfe von LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) transportiert werden, so dass auch die Rückgewinnung des Wasserstoffs und entsprechende Anforderungen an die Infrastruktur berücksichtigt werden müssen. Um Wasserstoffnetze flexibel zu betreiben und saisonale Effekte auszugleichen, werden zudem weitere ober- und unterirdische

Speicher benötigt, auch wegen der geringeren volumetrischen Speicherdichte von Wasserstoff im Vergleich zu Methan.

Die Energieforschung hat die Aufgabe, die vorhandenen Infrastrukturtechnologien weiterzuentwickeln und ihre systemische Planung und Integration zu verbessern. Dabei sind verschiedene Szenarien des Hochlaufs der Wasserstoffwirtschaft und variierende Importstrategien zu berücksichtigen. Auch Möglichkeiten zur Weiternutzung und Umrüstung bestehender Infrastrukturen sind Forschungsgegenstand im Hinblick auf Fragen zur Sicherheit und Lebensdauer unter den neuen Anforderungen.

2.1 Die Wasserstoff-Infrastruktur modellieren, planen und entwickeln

Damit die Wasserstoffinfrastruktur die hohen Erwartungen an Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und Resilienz erfüllen kann, ist es Aufgabe der Forschung, die Simulations- und Optimierungsmodelle aus der integrierten Systemplanung um die Besonderheiten der Wasserstoffinfrastruktur zu erweitern. Demnach soll das Nebeneinander von Import, regionalen Speicherkapazitäten und Erzeugungsanlagen aller Größenordnungen sowie großen Erzeugungsschwerpunkten und Stromerzeugungsanlagen für Dunkelflauten in den Modellen abgebildet werden. Mit Blick auf die Versorgungssicherheit mit Erdgas in der Transformationsphase sind die dafür benötigten Infrastrukturbedarfe zu ermitteln und bei der Modellierung zu berücksichtigen, insbesondere im Hinblick auf die Umrüstung der Erdgasinfrastruktur und -speicher auf Wasserstoff.

Da noch ein hohes Maß an Unsicherheit über die künftigen Entwicklungen besteht, sollen Modelle unterschiedliche Transformationspfade abbilden. Für den Fall einer Mangellage für Wasserstoff sollen Nutzungskonkurrenzen der Sektoren in die Modellrechnungen einfließen.

Die Energieforschung soll einen Beitrag zur Entwicklung eines einheitlichen Modells leisten, das zur Validierung des Netzentwicklungsplans Gas und Wasserstoff genutzt werden kann.

Ebenso soll die Forschung die Auswirkungen von Regulierung, Risikominderungsmaßnahmen und Anreizmechanismen im Hinblick auf die beschleunigte Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur modellieren.

2.2 Vorhandene Infrastruktur umrüsten

Viele Komponenten der Erdgasinfrastruktur lassen sich für Wasserstoff nutzen, jedoch unter angepassten Bedingungen. Materialforschung, neue zerstörungsfreie Prüfmethode und verbesserte Werkstoffmodelle sind zur Absicherung der Umnutzung notwendig. Auf operativer Seite sind Prozessschritte zur Umrüstung zu entwickeln und die Standardisierung zu begleiten.

Armaturen, Verdichter und Anlagen zur Gasaufbereitung sollen an die Herausforderungen des Mediums Wasserstoff und höhere Volumenströme angepasst werden. Auch Sensoren und Messmethoden sind dafür weiterzuentwickeln. Innovative Technologien, wie elektrochemische Kompressoren, sollen ebenfalls weiterentwickelt und skaliert werden.

Um den sicheren Betrieb einer dynamisch wachsenden Wasserstoffinfrastruktur zu gewährleisten, sind Sicherheitskonzepte anzupassen und in die Fachkräfteausbildung einzubringen. Dies betrifft neben den Speichern und dem leitungsgebunden auch den schienen- und straßenbasierten Transport.

2.3 Wasserstoff effizient speichern

Unterschiedliche Einsatzzwecke benötigen verschiedene technologische Speicherkonzepte. Ein flexibler Netzbetrieb erfordert oberirdische Druckbehälter. Für den Transport per Schiff, Bahn oder LKW kann das Verflüssigen oder Binden von

Wasserstoff an Trägermedien, wie flüssige organische Verbindungen (LOHC), vorteilhaft sein. In stationären Anwendungen können Metallhydride Einsatz finden. In allen Fällen soll die Energiedichte erhöht und energetische Verluste beim Ein- und Auspeichern sollen minimiert werden. Beim Speichern von flüssigem Wasserstoff sollen Verluste infolge von Verdampfung reduziert werden.

In Salzkavernen oder Porenspeichern ist großskalige Wasserstoffspeicherung möglich. Dafür können Erfahrungen aus der Erdgasspeicherung einfließen. Es werden jedoch zertifizierungsfähige Zemente und geeignete metallische Werkstoffe benötigt. Sicherheits- und Betriebskonzepte der Großspeicher sind ebenfalls anzupassen. Da mikrobiologische Prozesse im Untergrund die Reinheit des Wasserstoffs verändern können, besteht Entwicklungsbedarf bei der energieeffizienten Gasreinigung für entnommenen Wasserstoff.

2.4 Den Wasserstoffeinsatz unter realen Bedingungen erproben

Um eine nachhaltige und zuverlässige Wasserstoffwirtschaft vorzubereiten, sollen Technologien für Transport, Import, Speicherung und Nutzung in einem realistischen Umfeld erprobt werden. So lassen sich Betriebserfahrungen sammeln, Sicherheitskonzepte überprüfen und Flexibilitätspotenziale bestätigen. Zudem sollen Zertifizierungskonzepte für grünen Wasserstoff entwickelt und in der Praxis erprobt werden.

Programmziel 3 Effizienz bei der flexiblen Rückverstromung von grünem Wasserstoff erhöhen

Grüner Wasserstoff lässt sich lange Zeit nahezu verlustfrei speichern und bei Bedarf in Strom rückwandeln. So können Phasen mit weniger Wind- und Solarstrom überbrückt werden. Dafür werden effiziente Wasserstoffturbinen, Brennstoffzellen und Gasmotoren benötigt.

Jede der genannten Technologien hat spezifische Vorteile: Wasserstoffturbinen eignen sich zur großskaligen Deckung des Bedarfes an Residuallast im Stromnetz aufgrund großer installierbarer Leistungen und schneller Reaktionsmöglichkeiten auf Lastwechsel. Neben der Energiebereitstellung spielen Wasserstoffturbinen zudem für die Netzstabilisierung und Schwarzstartfähigkeit eine wichtige Rolle. Im kleineren Leistungsbereich hat die Brennstoffzelle ein breites Einsatzprofil als dezentrales stationäres Blockheizkraftwerk, Netzersatzanlage beziehungsweise Notstromaggregat und in mobilen Antrieben. Dabei steht die Brennstoffzelle teilweise in Konkurrenz zu Batterien. Gasmotoren sind geeignet, um dezentral Strom und Wärme zu erzeugen.

Technologien zur Wasserstoffrückverstromung machen das Energiesystem robuster und resilienter. Damit tragen sie zur Versorgungssicherheit und Stabilität des Stromnetzes bei. Durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird der Energieinhalt des Wasserstoffs am effizientesten genutzt. Die Energieforschung soll diese Technologien für die flexible, effiziente und kostengünstige Rückverstromung von grünem Wasserstoff in dezentralen und zentralen Reserve- und Spitzenlastkraftwerken optimieren.

3.1 Einsatzbereiche von Brennstoffzellen hochskalieren und erweitern

Brennstoffzellen lassen sich vielfältig einsetzen: industriell und netzdienlich, beispielsweise bei der dezentralen Stromerzeugung in (teil-)autarken Inselnetzen, bei der stromnetzunabhängigen Versorgung von Rechenzentren oder Industrieanlagen, in Netzersatzanlagen, Notstromaggregaten und in Hybridkraftwerken, die neben anderen erneuerbaren Energien auch Wasserstoff nutzen. Außerdem können sie als alternativer Antrieb für schwere Nutzfahrzeuge, Schiffe, Schienen- und Luftfahrzeuge dienen. Die Anwendungsbereiche liegen vorwiegend dort, wo eine ausreichende direkte Stromversorgung perspektivisch nicht absehbar ist oder aus Gründen der Resilienz eine redundante Versorgung erwünscht ist.

Forschung soll Brennstoffzellen weiter verbessern, die Lebensdauer und den Wirkungsgrad steigern sowie insbesondere die Kosten senken. Die Brennstoffzellen sollen optimal ins Energiesystem eingebunden und Strom und Wärme effizient genutzt werden. Weiterhin steht die industrielle Serienfertigung im Fokus. Brennstoffzellen sollen zudem durch Upscaling zu einer Option für Kraftwerke der Megawatt-Klasse weiterentwickelt werden.

3.2 Gasturbinen und Gasmotoren durch Umrüstung im Betrieb flexibilisieren

Gasturbinen und dezentrale, modulare Kraftwerksanlagen kleinerer und mittlerer Leistungsklasse mit Gasmotoren sollen mit bis zu 100 Prozent Wasserstoff und ggf. weiteren synthetischen Brennstoffen betrieben werden können. Dafür sind bestehende Anlagen umzurüsten und neue, optimierte Anlagen zu entwickeln. Im Fokus stehen Verbrennungsführung, Stickoxidemissionen, Materialien, Lastflexibilität, Wirkungsgrad, Lebensdauer und Effizienz der Abgasnutzung. Das Verbrennen von Wasserstoff mit reinem Sauerstoff aus der Elektrolyse (OxyFuel-Prozess) erzeugt hohe Wirkungsgrade in Gas- und Dampfkraftwerken, die in Kombination mit Elektrolyseuren betrieben werden.

Gleichzeitig sollen diese Anlagen in der Lage sein, auch unabhängig von der Wirkleistungserzeugung Systemdienstleistungen zur Verfügung zu stellen.

Programmziel 4 Industrieprozesse auf effiziente Wasserstofftechnologien umstellen

Industrieverfahren und -prozesse müssen soweit möglich mit klimaneutralen Brenn- und Reaktionsstoffen betrieben werden, wenn die Prozesse nicht elektrifiziert oder auf andere Weise klimaneutral gemacht werden können. Im Jahr 2020 hat der industrielle Erdgasverbrauch in Deutschland aus energetischer und stofflicher Nutzung circa 230 TWh betragen und damit etwa 46 Mio. Tonnen CO₂ emittiert. Entsprechend hoch ist damit das Potenzial, die industriellen Thermoprozesse mit Wasserstoff zu defossilisieren. Da der Bedarf an grünem Wasserstoff enorm steigen wird, sind Effizienz sowie die Entwicklung von alternativen Prozessen von besonderer Relevanz.

4.1 Hochtemperaturprozesse und -anlagen auf grünen Wasserstoff und Derivate umrüsten

Für eine sichere Verbrennung von Wasserstoff oder Derivaten und effizienten Energieeintrag müssen Komponenten und Prozesse weiterentwickelt werden. Materialunverträglichkeiten in Wasserstoffatmosphäre, in Gasen aus der Wasserstoffverbrennung sowie der Einfluss auf das Nutzgut sollen untersucht und minimiert werden. Mess-, Steuer- und Regelungsstrategien sind neuen Anforderungen anzupassen. Die Lebensdauer von Anlagen soll nicht beeinträchtigt werden und zugleich die Produktqualität gesichert sein. Durch Stresstest-Szenarien soll sichergestellt werden, dass das Umrüsten auf einen industriellen Wasserstoffeinsatz gelingt. Ziel ist, Prozesse wie beispielsweise Schmelzen, Sintern, Härten oder Gießen mit Wasserstoff-Industrieöfen zu demonstrieren und in relevanter industrieller Größenordnung die technische, qualitätssichere und wirtschaftliche Nutzung nachzuweisen.



SPRINTERZIELE

Die Investitionskosten für Elektrolyseure werden **bis 2030 unter 400 €/kW** gesenkt.

Bis 2035 soll die **elektrische Leistung um eine Größenordnung** und der **Gesamtwirkungsgrad von Brennstoffzellen-Kraftwerken** signifikant gesteigert werden.

Bis 2030 ist mindestens eine großskalige Infrastrukturkette mit Produktion, Transport, Speicherung und vollständiger Umstellung von industriellen Nutzern auf grünen Wasserstoff **großformatig demonstriert**.

Eine ressortübergreifende **Technologie- und Innovationsroadmap** Wasserstoff ist entsprechend der Nationalen Wasserstoffstrategie in **2024** vorzulegen.

Bis 2027 wird eine **bundeseinheitliche Modellierung der Gas- und Wasserstoffnetze** auf Basis gemeinsamer, bundeseinheitlicher Parameter erarbeitet.

MISSION

Transfer



Wir stärken die Rolle der Energieforschung als Impulsgeber des Fortschritts in Wirtschaft und Gesellschaft – durch Transparenz, Partizipation und Praxisorientierung.

Erfolgreiche Forschung profitiert von einem langfristig orientierten Förderrahmen, welcher der Kreativität in den Fortschritten, Rückschritten und erneuten Fortschritten des Forschungsprozesses angemessenen Raum lässt und dabei die Innovationen mit Zielvorgaben in eine Richtung lenkt. Die Erfolge der Forschungsförderung werden vor allem dann sichtbar, wenn die Projektergebnisse in der Praxis angewendet werden. Daher wird dem Transfer von Innovationen aus der Forschung in den Markt eine zentrale Rolle bei der Vollendung der Energiewende beigemessen. Die in den geförderten Projekten ausgelösten Innovationen sollen schneller zu marktfähigen neuen Geschäftsmodellen, Produkten und Dienstleistungen werden.

Das bestehende Instrumentarium der Projektförderung soll daher durch neue agilere Formate ergänzt werden. Die Stakeholder müssen immer besser eingebunden und eine verstärkte sozio-technische Transformation soll unterstützt werden. Diese Ausrichtung soll erhöhte Innovations- und Transferdynamik hervorbringen und auch die Agilität eines lernenden Programms ausnutzen.

Programmziel 1 Verfügbarkeit von qualifiziertem Fachpersonal für die Energiewende ausbauen (Capacity Building)

Die Energiewende erfordert qualifiziertes Fachpersonal in Handwerk, Wirtschaft, Forschungseinrichtungen und Kommunen. Die Verfügbarkeit von Fachkräften ist notwendig für die Resilienz des gesamten Systems und der Bedarf nimmt weiter zu wenn weitere Anteile der Wertschöpfungsketten in Deutschland entstehen. Um diese Kapazitäten auszubauen, sind umfangreiche Maßnahmen zur Aus- und Weiterbildung notwendig. Das Energieforschungsprogramm leistet einen Beitrag zur Minderung des Fachkräftemangels für die Energiewende, indem die Qualifizierung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern im Rahmen von Projekten gefördert wird. Zudem wird der Aufbau von Fachwissen in Forschungsinstituten, Wirtschaftsunternehmen und vielen weiteren Institutionen durch vielfältige Vernetzungsmaßnahmen innerhalb der Forschungsnetzwerke Energie sowie durch den Brückenschlag zwischen aktiver Forschung und Praxisakteuren wie Kommunen, Stadtwerken, Energieversorgern und Anwendern unterstützt.

1.1 Forschungsnachwuchs in Förderprojekten qualifizieren

Die Zusammenarbeit von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern mit erfahrenem wissenschaftlichen Personal im Rahmen der geförderten Energieforschung trägt dazu bei, praxisrelevante, aktuelle Arbeiten in der universitären Ausbildung zu verankern. Um die dabei entstehenden Forschungsergebnisse schneller in die Wirtschaft zu übertragen, soll eine noch stärkere personelle Vernetzung angestrebt werden. Dabei führen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ihre Forschungsarbeiten in (oder in enger Kooperation mit) Unternehmen durch. Dementsprechend liegt bei der Auswahl der Förderprojekte im Energieforschungsprogramm ein noch stärkeres Gewicht auf ein enges Verzahnen von Wissenschaft und Wirtschaft.

1.2 Fachwissen in Forschungsinstituten, Unternehmen und vielen weiteren Institutionen ausbauen

Die vielfältigen Forschungsarbeiten in Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen bilden einen großen Fundus an energietechnischem Wissen. Um dieses Potenzial noch besser nutzen zu können, sollen die beteiligten Akteure und Akteurinnen stärker für spätere Anwendungen und Geschäftsmodelle sensibilisiert oder befähigt werden. Auch zielgruppenspezifische Fachkommunikation soll anhand guter Praxisbeispiele dazu beitragen.

1.3 Vernetzung zwischen Forschung und Praxis verstärken

Die Forschungsnetzwerke Energie des BMWK bilden mit ihren mehreren tausend aktiven Mitgliedern und regelmäßigen Veranstaltungen ein etabliertes Forum für den fachlichen Austausch zwischen akademischer Forschung und der Praxis wie Unternehmen, Energieversorger, Kommunen und Planungsbüros. Um den Transfer praxisnaher Forschungsarbeiten in Betriebe besser zu unterstützen, werden die einschlägigen Vertretungen der Industrie und des Handwerks (Industrie- und Handelskammern, Handwerkstage der Bundesländer und Handwerkskammern) über die Inhalte der Netzwerkarbeit zielgerichtet informiert und eingebunden.

1.4 Alle gesellschaftlichen Potenziale nutzen

Frauen sollen angemessen und stärker repräsentiert sein. Forschungsarbeiten und ihr Transfer in die Anwendung können je nach thematischem Fokus davon profitieren, auch weitere gesellschaftliche Gruppen stärker einzubinden. In bestimmten Fällen kann durch die frühe Einbeziehung Betroffener die umfassende Kenntnis lokaler Gegebenheiten genutzt werden und das Engagement und die Akzeptanz bei energiepolitischen Maßnahmen gesteigert werden.

Programmziel 2 Innovations- und Portfoliomanagement in der Energieforschung festigen

Energieforschung soll zu einer größeren Innovationsdynamik beitragen und die Zeitspanne bis zur Markteinführung von Projektergebnissen verkürzen. Innovationsmanagement und Portfoliosteuerung mit Fokus auf unternehmerische Treiber sind hierfür wichtige Hebel. In der Verbundförderung sollen eine Risikosteuerung beachtet sowie Synergie- und Verwertungspotenziale ausgeschöpft werden.

2.1 Verwertungsoptionen von Projektergebnissen laufend weiterentwickeln und die Konkretisierung unterstützen

Die den Verwertungsplänen zugrundeliegenden Annahmen der Projektpartner werden systematisch ausgewertet und laufend überprüft. Dies ermöglicht in den Projektkonsortien ein verbessertes Innovationsmanagement. So können während der Projektlaufzeit und im Anschluss neue Geschäftschancen identifiziert, Marktstudien gefördert oder Kontakte zu Entwicklungs- und Marktpartnern angereizt oder vermittelt werden.

2.2 Prioritäre Technologiefelder in einer Portfoliostrategie mit einer diversifizierten Innovationspipeline adressieren

Mit zunehmender thematischer Ausdifferenzierung der Energieforschung und steigendem Effizienzdruck gewinnen Portfolioaspekte bei Förderentscheidungen an Bedeutung. Infolgedessen wird in der Projektförderung auf eine ausgewogene Mischung von Themen, Akteuren und Risiken geachtet, um Chancen auszuschöpfen.

Ein Fokus der Forschungsförderung liegt auf anwendungsnahen Projekten mit mittlerem bis hohem Technologiereifegrad (TRL). Indem vereinzelt auch frühphasige, besonders potenzialträchtige Projekte (mit niedrigem TRL) gefördert werden, entsteht eine Risikostreuung.

Programmziel 3 Agile Prozesse und Formate nutzen

Der Forschungsbedarf in einem sich dynamisch verändernden Umfeld soll schneller und wirksamer adressiert werden. Durch Weiterentwicklung der Prozesse und Formate soll die Forschungsförderung agiler werden. Agilität bedeutet dabei innerhalb eines lernenden Förderprogramms kurze Umsetzungsfristen („Time to Grant“), eine hohe Reflexivität auf neue Erkenntnisse und eine hohe Flexibilität bei unvorhergesehenen Ereignissen und neuen Anforderungen.

3.1 Prozesse und Formate der Projektförderung weiterentwickeln

Durch beschleunigte Antragsprozesse, kleinformartige, kurzlaufende Projekte und durch eine intensivere, zielgerichtete Evaluation laufender Projekte sollen schnelle Lernschleifen entstehen. Kleinprojekte mit verschlanktem Antragsprozess eignen sich besonders, um drängende Forschungsfragen und Förderbedarfe fokussiert in einem „Trial & Error“-Ansatz zu klären. Das Förderformat der Mikroprojekte wird unter ganzheitlicher Beachtung der Maßnahmenwirtschaftlichkeit auf alle Forschungsthemen ausgeweitet und gestärkt. Zudem werden die Evaluation und das Monitoring laufender Projekte stärker darauf ausgerichtet, Fortschritte zeitnah zu erfassen.

Um mehr kleine Unternehmen und Start-ups als Akteure zu gewinnen und den Zugang zur Energieforschungsförderung zu erleichtern, sollen Prozesse weiter vereinfacht und angepasst werden.

3.2 Bewährte Projektförderpraxis um neue wettbewerbliche Formate und experimentelle Ansätze ergänzen

In Wettbewerben konkurrieren etablierte und neue Forschungsakteure um ihre besten Ideen. Internationale Beispiele belegen, dass aus solchen „Challenges“ bahnbrechende Entwicklungen entstehen können. Wettbewerbe werden für bestimmte, fokussierte Fragestellungen initiiert.

Experimentelle Ansätze sollen im Kontext der Energieforschung dazu dienen, Forschungsergebnisse im realen Anwendungskontext zu erproben und die Sichtbarkeit guter Lösungen zu erhöhen. Dies geschieht im Rahmen von einzelnen Demonstrations- und Modellvorhaben, aber auch auf größerer Skala in systemisch angelegten Experimentierräumen mit längerfristigen transformativischen Lernzielen.

3.3 Agile Projektförderung

Das zentrale Format des Energieforschungsprogramms ist die Projektförderung mit in der Regel über drei Jahre vorgeplanten Verbundprojekten. Die Prozessabläufe in der Förderung bieten den beteiligten Fördermittelnnehmern Planungssicherheit. Zum Wesen der Forschung gehört auch der Erkenntnisfortschritt während der Projektlaufzeit und die Revision der Arbeitspläne im Einklang mit den Projektzielen. Bei unvorhersehbaren Entwicklungen können auch ergänzende Projektteile oder fehlende Kompetenzträger an laufende Verbundprojekte angedockt werden.

Programmziel 4 Technologisches Innovationspotenzial erschließen und Wertschöpfungsketten erhalten und ausbauen

Kompetenzaufbau und Innovationen bei den für die Klimaneutralität entscheidenden Schlüsseltechnologien und ein gesicherter Zugriff auf die gesamte Wertschöpfungskette sind wichtige Ziele der Energieforschungsförderung. Leitbild ist das Erreichen einer umfassenden (europäischen) Technologiesouveränität. Zugleich bleibt in Bezug auf Exportpotenziale auch das Ziel einer Technologieführerschaft im Blick.

4.1 Deutsche Hersteller und Forschungskollaborationen mit europäischen Partnern fördern

Energieforschungsförderung erkennt und schließt Forschungslücken, damit deutsche Hersteller eine Technologieführerschaft von Schlüsseltechnologien aufbauen und absichern können. Ein besonderes Augenmerk liegt auf dem Entwickeln von Fertigungs- und Produktionsverfahren. Durch die Fördermaßnahmen soll die Wirtschaft auf dem Gebiet der Schlüsseltechnologien für die Energiewende unterstützt und die Akteursbasis verbreitert werden. Dazu werden im Rahmen des SET-Plans der EU-KOM auch Forschungskollaborationen mit europäischen Partnern in Bereichen unterstützt, wo dies Kompetenzen und Erfolgchancen von Projektverbänden stärkt.

4.2 Vollständige Wertschöpfungsketten des Energiesystems berücksichtigen

Beim Entwickeln von Schlüsseltechnologien werden die beim industriellen Einsatz wichtigen Bezüge zur gesamten Wertschöpfungskette berücksichtigt. Dabei geht es nicht nur um das Ineinandergreifen industrieller Wertschöpfungsstufen und die Balance von Zulieferern und Systemherstellern, sondern auch um die vorgelagerte Rohstoffversorgung und die nachgelagerte Weiterverwendung, Aufarbeitung oder Entsorgung im Sinne einer zirkulären Wirtschaft. Um das Energiesystem

unabhängiger von internationalen Lieferquellen begrenzter Rohstoffe zu machen, werden insbesondere Technologieentwicklungen, die den Einsatz dieser Rohstoffe reduzieren oder vermeiden, gefördert. Parallel sollen für rohstoffsensible Technologien Konzepte der Kreislaufwirtschaft entwickelt und erprobt werden.

4.3 Fertigung von Erneuerbare-Energie-Anlagen in Deutschland und Europa absichern

Essenzieller Treiber der Energiewende ist der schnelle Ausbau regenerativer Stromerzeugung. Ein besonderes Ziel der Energieforschung liegt darin, die inländische industrielle Basis für das Herstellen der Erzeugungsanlagen technologisch zu flankieren und die Parameter für Errichtung, Betrieb und Netzeinbindung der Anlagen zu verbessern. Eine starke Marktposition deutscher und europäischer Anlagenhersteller schafft gleichzeitig eine gute Ausgangsposition für Exportpotenziale und eine hohe Resilienz gegenüber Veränderungen auf dem Weltmarkt.

Programmziel 5 Akzeptanz und Nachnutzungsmöglichkeiten in der Energieforschung durch Prinzipien der Offenen Wissenschaft steigern

Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung sollen für die Anwendung in der Praxis und für das Nachnutzen in Forschungs- und Entwicklungsprojekten besser verfügbar werden. Zusammenhänge sollen für die Gesellschaft verständlich aufbereitet und Akzeptanzhürden abgebaut werden.

5.1 Anteil von Open-Access-Veröffentlichungen in den Förderprojekten erhöhen

Um die Transparenz und Akzeptanz von energie- und klimapolitischen Entscheidungen zu verbessern und um das Verständnis komplexer Zusammenhänge und Auswirkungen in der Energiewende zu erhöhen, spielt Open Science (Open

Data, Open Source, Open Access) eine Schlüsselrolle. In der Projektförderung soll daher das Umsetzen von Open-Science-Ansätzen diese als wissenschaftlichen Standard in der Forschung stärken. Dadurch werden Forschungsergebnisse für die Praxis sowie der Einsatz in weiteren Forschungs- und Entwicklungsprojekten besser verfügbar. Die Publikation von Forschungsergebnissen soll möglichst gemäß Open-Access-Standards erfolgen.

5.2 Erhobene Daten aus Forschungsvorhaben Open Access und FAIR zur Verfügung stellen.

Um die Nutzbarkeit von Forschungsergebnissen zu erhöhen, soll sich der Umgang mit den in geförderten Vorhaben erhobenen Daten im Allgemeinen an den FAIR-Prinzipien orientieren (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Solange dem keine Geschäftsgeheimnisse oder andere Gründe entgegenstehen, sollen Forschungsdaten aus Förderprojekten Open Access und mit entsprechenden Lizenzen versehen veröffentlicht werden.

5.3 Anteil an geförderten Projekten mit Citizen Science oder Bürgerbeteiligung erhöhen

Um die Einbeziehung der Gesellschaft an Forschungsergebnissen zu stärken, sollen Partizipationsformate und Citizen-Science-Ansätze im Sinne einer offenen Wissenschaftskultur erprobt werden. Dadurch lassen sich die gesellschaftliche Relevanz, Mitgestaltung und Akzeptanz von Energieforschung anregen und heterogene Wissensquellen erschließen. Dies gilt insbesondere für Reallabore der Energiewende, Demonstrationsvorhaben und Projekte zu Akzeptanzfragen und Nutzerverhalten im energiewirtschaftlichen Kontext.



SPRINTERZIELE

Um alle Potenziale für die Energiewende zu nutzen, wird **bis 2030** der **Frauenanteil in allen Karrierestufen in der Gesamtmenge der geförderten Energieforschungsprojekte** mindestens dem Anteil der Absolventinnen der MINT-Studiengänge entsprechen.

Das Format Reallabore der Energiewende wird fortgesetzt, die Förderauswahl für neue **Reallabore der Energiewende bildet die Missionen nach**.

Bis ein angemessenes Niveau erreicht ist, werden für **agile und möglichst unbürokratische Förderformate** (z.B. Mikro-Projekte) ab 2024 stetig steigende Anteile des verfügbaren FuE-Budgets bereitgestellt.

Das Format der Mikro-Projekte wird auf alle Bereiche der BMWK-Energieforschung ausgerollt.

Eine Kooperation mit der SPRIND zu agilen Förderformaten wird ermöglicht, um den Beitrag von Innovationen zur Energiewende schneller zu erhöhen.

Governance und Schnittstellen



Das Energieforschungsprogramm ist ein wichtiger Baustein zur Vollendung der Transformation im Energiesystem und zur Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung. Durch die Operationalisierung eines missionsorientierten und lernenden Energieforschungsprogramms soll die nachhaltige Ausrichtung der einzelnen Maßnahmen auf die energie- und klimapolitischen Vorgaben gewährleistet werden. Dafür werden **folgende Kernprozesse** eingerichtet:

1. Die Festlegung und das Monitoring von Programmzielen.

Neben der Beschreibung der Ziele sowie ihre Priorisierung erfolgt in der Programmumsetzung auch eine Festlegung der Erfolgsindikatoren (KPI). Die Aktualisierung und Anpassung von Zielen ermöglichen das strategische Lernen (Rückkopplung) innerhalb des Programms, um zukünftigen Herausforderungen besser begegnen zu können.

2. Die Auswahl und das Design von Instrumenten sowie Priorisierung von Maßnahmen.

Geeignete Förder- und Steuerungsinstrumente sind die Grundlage für Strukturen und Prozesse eines agilen und lernenden Energieforschungsprogramms. Um die Hebelwirkung zu erhöhen, werden neben der klassischen Projektförderung als Basisformat weitere Möglichkeiten innerhalb der Gestaltungsspielräume eines Forschungs- und Innovationsprogramms genutzt. Dabei werden budgetäre Randbedingungen durch fortwährende Überprüfung der Priorisierung der Ziele berücksichtigt, um eine Gesamtnutzenoptimierung zu erreichen.

3. Die Umsetzung, das Monitoring und die Evaluation der Maßnahmen.

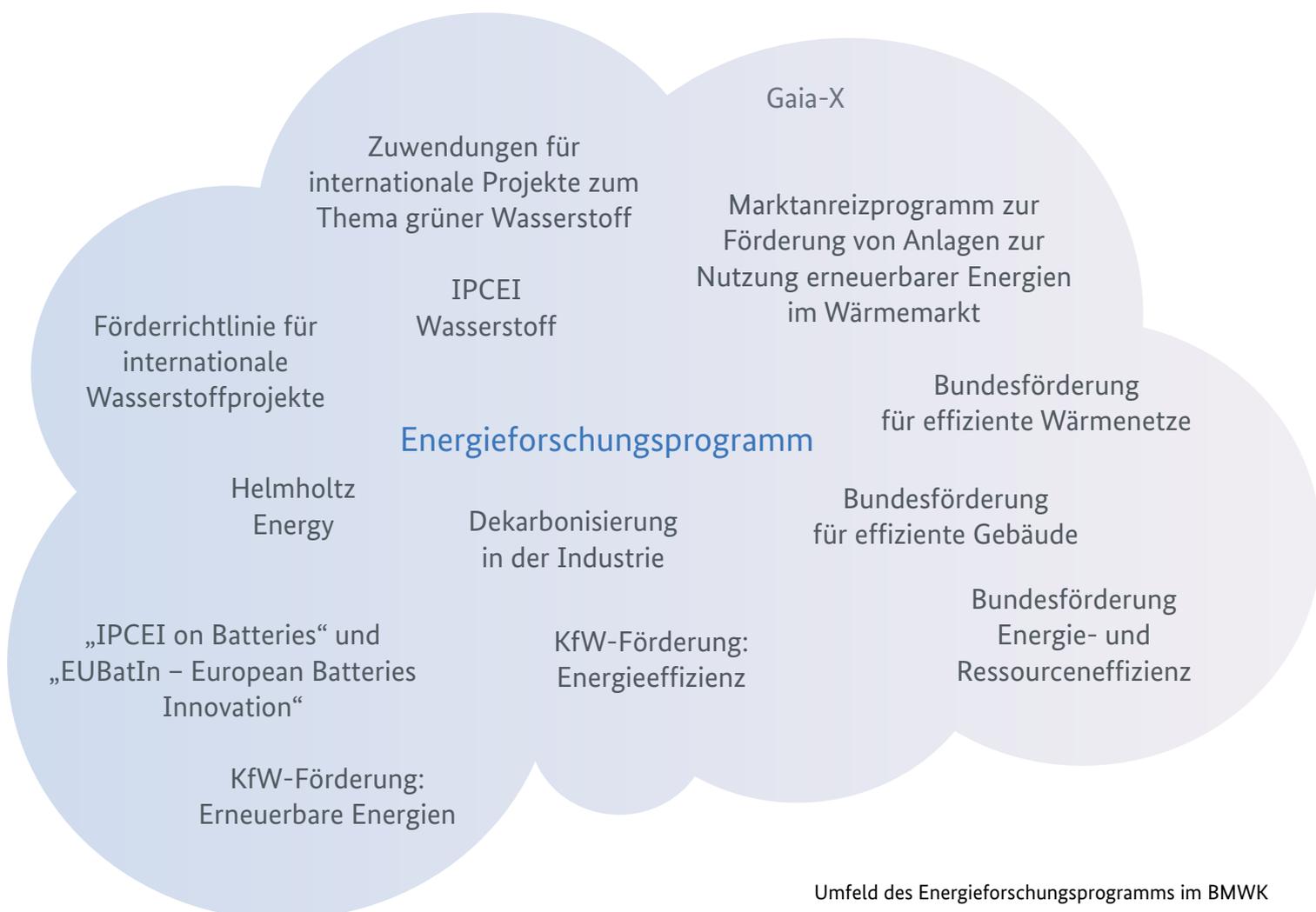
Anhand eines verifizierbaren Outputs kann die Effektivität des Programms regelmäßig überprüft werden. Die Maßnahmen des Programms werden extern evaluiert. Dafür werden auch die Stakeholder des Programms mit einbezogen.

Koordinierung, Vernetzung und Schnittstellen

Zum Erfolg von Transformationen ist ein intensives Wechselspiel von neuen Ideen und Innovationen aus Industrie und Wissenschaft mit Strukturen und Regulierungen sowie der Diskurs auf der gesamtgesellschaftlichen Ebene erforderlich. Im Rahmen des Programm-Managements werden daher verschiedene Akteurinnen und Akteure in geeigneten Formaten (auf Programm- beziehungsweise Fach-ebene) einbezogen.

Die fokussierte Zielsetzung des Energieforschungsprogramms auf ein klimaneutrales und resilientes Energiesystem in 2045 unterstreicht die Rolle der Energieforschung als strategisches Instrument der Energiepolitik. Damit geht eine enge Verzahnung und Abstimmung der Energieforschungspolitik mit angrenzenden Politikbereichen im BMWK einher.

Auf diese Weise kann Spitzenforschung in den politischen Konsultations- und Gestaltungsprozessen Eingang finden. Zugleich werden Strategieprozesse der Energie-, Klima- und Industriepolitik bei der Festlegung von neuen Maßnahmenzielen im Sinne eines lernenden Energieforschungsprogramms berücksichtigt (unter anderem Nationale Wasserstoffstrategie, PV-Strategie, Gebäudestrategie). Der Austausch wird durch **Koordinierungsgruppen** im BMWK entlang den Programmmissionen stärker formalisiert und vor allem im Rahmen von **jährlichen Strategiegesprächen zu den Missionen des Energieforschungsprogramms** stattfinden. Das Format beinhaltet auch den **Austausch zu weiteren Förderprogrammen** des BMWK, um Synergien zu erschließen und die Fördereffizienz zu erhöhen. Ausgehend von diesen Formaten kann dann eine zielgerichtete und punktuelle weitere Einbindung in die Prozesse vereinbart werden.



Förderinteressierte können die **Förderberatung des Bundes** in Anspruch nehmen, um Informationen zur Wahl eines passenden Förderprogramms zu erhalten.

Um die frühzeitige und zielgerichtete Koordination der FuI-Maßnahmen mit Energieschwerpunkt verschiedener Bundesressorts zu ermöglichen, wird das BMWK in seiner Rolle als Federführer die etablierte **Koordinierungsplattform Energieforschung** der Bundesressorts stärken und diese ggf. erweitern, um aktuelle Zuständigkeiten in der Förderpolitik abzubilden. Durch regelmäßige Sitzungen wird sichergestellt, dass geplante Maßnahmen aufeinander abgestimmt und Synergien durch Kooperationen erschlossen werden können. Auch das etablierte **Bund-Länder-Gespräch Energieforschung** wird fortgesetzt, um den Austausch des Bundes mit den Ländern zu intensivieren und die Zusammenarbeit in ausgewählten Bereichen auszubauen.

Das BMWK wird einen **Programmbeirat** einberufen, der zur Ausrichtung und Ausgestaltung des Energieforschungsprogramms beraten soll. Der Beirat soll die wissenschaftliche Expertise zu fachlichen Themen der Programmmissionen abdecken.

Der Austausch und die Interaktion mit der gesamten Forschungscommunity wird weiterhin über die **Forschungsnetzwerke Energie** organisiert. Diese bilden die Breite und Tiefe der Themen der Energieforschung auf hohem Niveau ab und sind daher ein wichtiges Instrument für die Rückkopplung zwischen dem Programm-Management und den Forschenden. Die Gesamtkoordinierung erfolgt mit Unterstützung einer Geschäftsstelle.

Institutionelle Förderung

Einen besonderen Stellenwert in der Vernetzung der BMWK Energieforschung nimmt der Austausch mit dem Fachbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (HGF) ein. Die Forschungsarbeiten der HGF sind in die Programmorientierte Förderung (POF) eingebettet, so dass Ressourcen der einzelnen Forschungszentren gebündelt und auf langfristige Forschungsziele des Staates und der Gesellschaft ausgerichtet werden. Die institutionelle Förderung ist das geeignete Mittel, um große Forschungsinfrastrukturen langfristig zu finanzieren, nachhaltig zu betreiben und ggf. auch externen Nutzenden aus Wirtschaft und Wissenschaft zur Verfügung zu stellen. Die wissenschaftliche Arbeit der HGF-Zentren soll konkrete Beiträge zum Gelingen der Energiewende (national und global) anstreben. Im Rahmen der institutionellen Förderung aufgebaute Kompetenzen und Infrastrukturen können und sollen zudem wichtige Beiträge zu Verbundvorhaben der Projektförderung leisten.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wird als einziges HGF-Zentrum durch das BMWK institutionell gefördert (alle anderen durch das BMBF). Mit dem Forschungsbereich Energie des DLR findet ein jährlicher Energieforschungsdialog statt.

Das BMWK als Federführer in der Energieforschungspolitik leitet gemeinsam mit dem HGF-Vizepräsidenten für den Forschungsbereich Energie die Forschungsbereichsplattform Energie. Der Rahmen wird künftig auch dafür genutzt, die Ausrichtung des Forschungsbereichs Energie in **Bezug zu den Missionen des Energieforschungsprogramms des BMWK** kontinuierlich zu beleuchten und zu diskutieren.

Transparenz

Für die Förderpolitik ist eine transparente Kommunikation gegenüber allen Anspruchsgruppen entscheidend dafür, dass Forschung unterstützt wird, die später erfolgreich in der Praxis angewendet werden kann und zu den Zielen der Energie- und Klimapolitik beiträgt. Hierzu setzt das BMWK verschiedene Formate und Instrumente des Austauschs und der Informationsverbreitung, insbesondere zu Förderangeboten, Forschungsergebnissen und -entwicklungen, ein. Außerdem stellt eine aktive Forschungskommunikation Transparenz bei der Verwendung von Fördermitteln her. Geeignete Formate und Instrumente werden stetig weiterentwickelt und transparent kommuniziert.

Der jährliche **Bundesbericht Energieforschung** wird fortgeführt. Neben der BMWK-Energieforschung werden FuI-Maßnahmen mit dem Schwerpunkt Energie weiterer Bundesressorts dargestellt. Der Bericht fasst außerdem die Energieforschungsförderung der Länder zusammen. Zusätzlich wird

das BMWK über Fortschritte und Aktualisierungen seiner Programmziele, im Sinne eines lernenden Programms, informieren.

Über das zentrale Web-Portal www.energieforschung.de werden alle wichtigen Informationen zum Energieforschungsprogramm, der Förderpolitik des BMWK sowie Forschungserfolge kommuniziert.

Das webbasierte **Informationssystem EnArgus** stellt die ressortübergreifende Projektförderung der Bundesregierung im Energiebereich dar, bietet eine Datenbank mit intelligenter Suchfunktion und trägt damit maßgeblich zur Transparenz hinsichtlich der Verwendung von Steuergeldern bei. Das umfassende Internetportal www.enargus.de informiert zu laufenden und abgeschlossenen Forschungsvorhaben der Energieforschung. Die stetige Weiterentwicklung und Optimierung des Portals ist ein zentrales Element der Energieforschungspolitik des BMWK.



