



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Innovationen für die Energiewende

7. Energieforschungsprogramm

der Bundesregierung

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Öffentlichkeitsarbeit
11019 Berlin
www.bmwi.de

Stand

September 2018

Druck

Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG,
Frankfurt

Gestaltung

PRpetuum GmbH, München

Bildnachweis

Getty Images
anucha sirivisansuwan / S. 9
Artur Debat / S. 22
Casarsa / S. 79
Caspar Benson / S. 49
Henglein and Steets / S. 37
KTSDSIGN/SCIENCE PHOTO LIBRARY / S. 84
Michael Steffen / EyeEm / S. 60
MirageC / S. 17
Paolo Carnassale / S. 75
PM Images / S. 5

iStock

imaginima / Titel
tolgart / S. 71



Diese und weitere Broschüren erhalten Sie bei:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Referat Öffentlichkeitsarbeit
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
www.bmwi.de

Zentraler Bestellservice:

Telefon: 030 182722721
Bestellfax: 030 18102722721

Diese Publikation wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Die Publikation wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Innovationen für die Energiewende

7. Energieforschungsprogramm

der Bundesregierung

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 4 |
| 1. Zusammenfassung | 5 |
| 2. Einleitung | 9 |
| 2.1 Energiepolitische Herausforderungen | 10 |
| 2.2 Strategische Ziele der Energieforschungspolitik | 13 |
| 2.3 Rahmen und Struktur der Energieforschungspolitik | 15 |
| 3. Fokus: Technologie- und Innovationstransfer | 17 |
| 3.1 Reallabore der Energiewende | 18 |
| 3.2 Startups: neue Akteure der Energiewende | 19 |
| 3.3 Austausch und Vernetzung: Energiewende-Plattform Forschung und Innovation und Forschungsnetzwerke Energie | 19 |
| 3.4 Forschungskommunikation | 20 |
| 4. Projektförderung | 22 |
| 4.1 Energiewende in den Verbrauchssektoren | 23 |
| 4.1.1 Gebäude und Quartiere | 23 |
| 4.1.2 Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen | 29 |
| 4.1.3 Schnittstellen der Energieforschung zu Mobilität und Verkehr | 33 |
| 4.2 Energieerzeugung | 37 |
| 4.2.1 Photovoltaik | 37 |
| 4.2.2 Windenergie | 40 |
| 4.2.3 Bioenergie | 42 |
| 4.2.4 Geothermie | 44 |
| 4.2.5 Wasserkraft und Meeresenergie | 45 |
| 4.2.6 Thermische Kraftwerke | 46 |
| 4.3 Systemintegration: Netze, Speicher, Sektorkopplung | 49 |
| 4.3.1 Stromnetze | 49 |
| 4.3.2 Stromspeicher | 52 |
| 4.3.3 Sektorkopplung | 56 |
| 4.4 Systemübergreifende Forschungsthemen der Energiewende | 60 |
| 4.4.1 Energiesystemanalyse | 60 |
| 4.4.2 Digitalisierung der Energiewende | 63 |
| 4.4.3 Ressourceneffizienz für die Energiewende | 64 |
| 4.4.4 CO ₂ -Technologien für die Energiewende | 66 |
| 4.4.5 Energiewende und Gesellschaft | 67 |
| 4.4.6 Materialforschung für die Energiewende | 69 |
| 4.5 Nukleare Sicherheitsforschung | 71 |
| 4.5.1 Reaktorsicherheitsforschung | 72 |
| 4.5.2 Entsorgungs- und Endlagerforschung | 73 |
| 4.5.3 Strahlenforschung | 74 |
| 4.6 Leitfaden für die Projektförderung | 75 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Institutionelle Förderung | 79 |
| 5.1 Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren..... | 80 |
| 5.1.1 Der Forschungsbereich Energie in der HGF..... | 80 |
| 5.1.2 Inhalte und Strukturen des Forschungsbereichs Energie..... | 80 |
| 5.1.3 Fusionsforschung (Hochtemperatur-Plasmaforschung)..... | 81 |
| 5.1.4 Transfer und Kommunikation..... | 82 |
| 5.2 Weitere institutionell geförderte Forschung..... | 83 |
| 6. Internationale Zusammenarbeit | 84 |
| 6.1 Internationalisierungsstrategie der Forschungspolitik..... | 85 |
| 6.2 Europäische Zusammenarbeit..... | 86 |
| 6.3 Internationale Organisationen..... | 87 |
| 6.4 Internationale Zusammenarbeit in der nuklearen Sicherheitsforschung..... | 88 |
| 6.5 Mission Innovation..... | 88 |
| Anhang | 89 |
| Glossar | 89 |
| Abkürzungsverzeichnis | 95 |

Vorwort

Die Energiewende ist eine der größten gesellschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit. Eine verlässliche, klimaverträgliche Energieversorgung zu bezahlbaren Preisen und der effiziente Einsatz von Energie bilden die Grundlage unserer Wirtschafts- und Energiepolitik. Der Erfolg der Energiewende entscheidet darüber, wie unsere Gesellschaft sich entwickelt, sichert Wohlstand und bewahrt die natürlichen Ressourcen. Hier ist es unser Auftrag, ebenso sorgsam wie entschieden zu handeln und unsere Umsetzungsstrategien fortwährend zu optimieren.

Wir stehen mitten in einem tiefgreifenden Umbau unseres Energiesystems. Den Anteil erneuerbarer Energien und die dafür erforderlichen Transportnetze weiter auszubauen, Energie hocheffizient zu nutzen und den energiebedingten Kohlendioxidausstoß deutlich zu senken sind zentrale Herausforderungen der Energiewende. Diese gewaltige Aufgabe können wir mit Innovationen und neuen Technologien besser und effektiver meistern. Dabei müssen wir anders denken als früher. Denn es gilt, vorhandene und neue Technologien sektorübergreifend zu vernetzen, Chancen der Digitalisierung zu nutzen, neue Geschäftsmodelle zu ermöglichen und immer mehr Akteure einzubinden. Um das ambitionierte Zukunftsprojekt zum Erfolg zu führen, müssen wir heute die Weichen dafür stellen. Eine Schlüsselrolle dabei spielt die Energieforschung als Wegbereiter der Energiewende.

Mit dem 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ legt die Bundesregierung ihre Leitlinien für die Energieforschungsförderung der kommenden Jahre fest. Dabei verfolgt sie einen neuen strategischen Ansatz und richtet den Fokus auf den Technologie- und Innovationstransfer. In „Reallaboren der Energiewende“ sollen neue, vielversprechende Technologielösungen an den Markt herangeführt werden und sich den Herausforderungen der Praxis stellen. Erfahrungen, die daraus gewonnen werden, sind ein Kompass für das spätere Umsetzen im großen Maßstab. Dabei wird auch die bessere Teilhabe junger, kreativer Startups eine wichtige Rolle spielen.

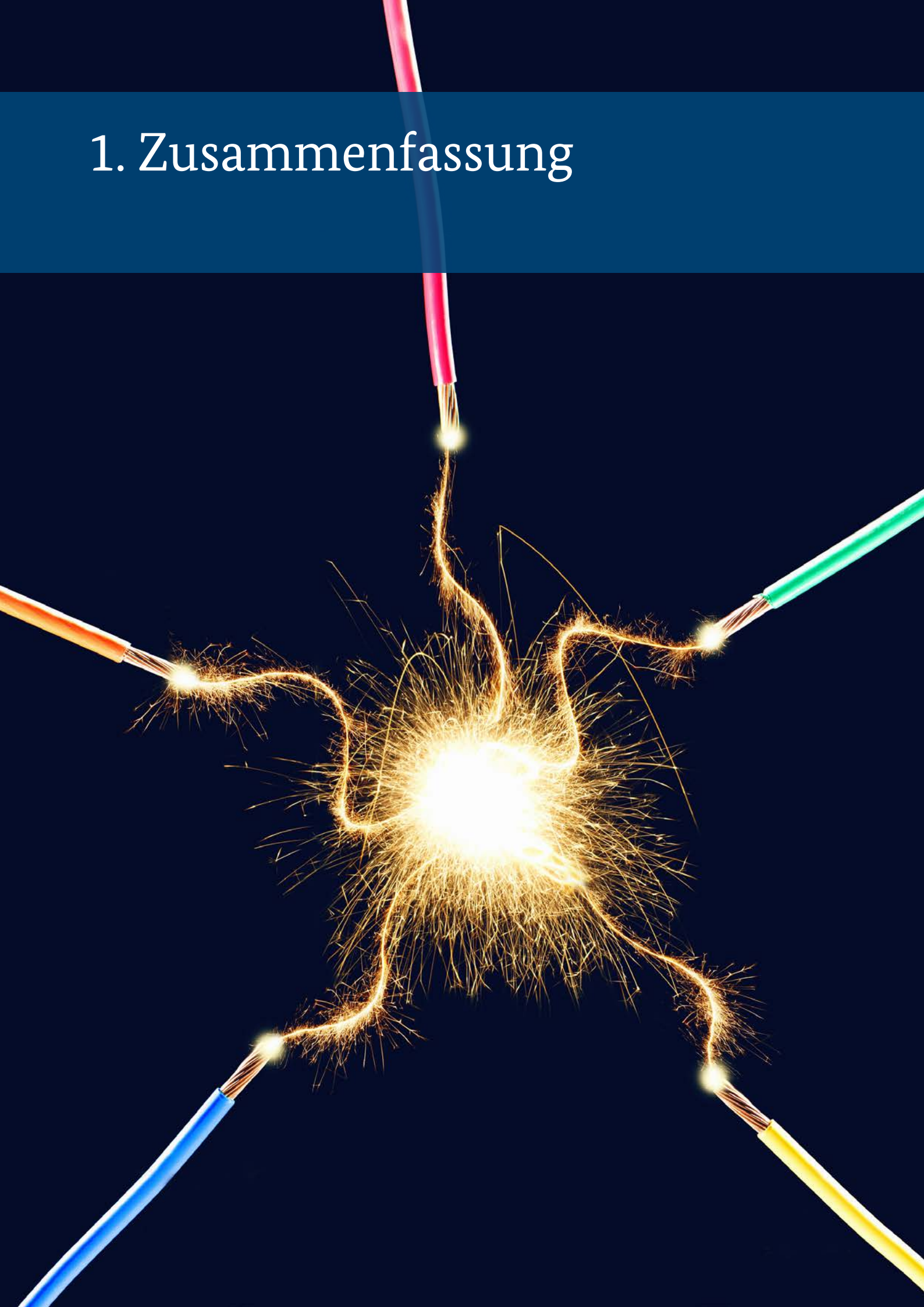
Gleichzeitig stärkt das neue Programm die Technologie- und Innovationsförderung im Energiebereich und ergänzt sie mit einer zusätzlichen Dimension zur gesamtgesellschaftlichen und systemischen Ausrichtung. So werden die großen, übergeordneten Trends im Energiebereich stärker in den Fokus genommen: Die Sektorkopplung beispielsweise ist entscheidend für die Entwicklung des Gesamtsystems. So soll der Strommarkt mit dem Wärme-, Verkehrs- und Industriesektor effektiv interagieren. Auch die Digitalisierung spielt eine Schlüsselrolle bei der Modernisierung des Energiesystems.

Schließlich strebt die Bundesregierung mit ihrem 7. Energieforschungsprogramm eine enge Vernetzung der Forschung auf internationaler und europäischer Ebene an. Denn die Energiewende ist und bleibt eine globale Herausforderung.

Zur Vorbereitung des neuen Programms hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in einem breit angelegten Konsultationsprozess zahlreiche Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft zu den notwendigen Innovationsschritten für den Erfolg der Energiewende befragt. Denn das neue Programm soll einen hohen Praxisbezug von Forschung und Entwicklung sicherstellen und die Transformation von hochinnovativen Ideen in erfolgreiche Produkte und Verfahren unterstützen. Auf Basis der Ergebnisse hat das Bundeswirtschaftsministerium gemeinsam mit den Bundesministerien für Bildung und Forschung sowie für Ernährung und Landwirtschaft das neue Energieforschungsprogramm erarbeitet.

Jetzt kommt es darauf an, dass sich zahlreiche Akteure aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft auf dieser Grundlage in der Forschung zur Energiewende engagieren. Das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung wird ein starker Innovationstreiber sein. Es bietet vielfältige und umfassende Fördermöglichkeiten für Projektpartnerschaften. Gestalten Sie den Umbau unseres Energiesystems mit!

1. Zusammenfassung



Mit ihrem 7. Energieforschungsprogramm „Innovationen für die Energiewende“ knüpft die Bundesregierung an die Erfolge der Energieforschung in den vergangenen Jahren an, setzt neue Akzente und definiert Schwerpunkte für die Forschungsförderung und Innovationspolitik im Energiebereich. Das Programm ist Ergebnis eines umfangreichen Konsultationsprozesses, an dem sich Akteure aus Verbänden und Unternehmen, Forschungs- und Wissenschaftsorganisationen, Mitglieder der Forschungsnetzwerke und Vertreter der Bundesländer beteiligt haben.¹ Als strategisches Element der Energiepolitik ist das Programm an der Energiewende ausgerichtet und adressiert mit einem ganzheitlichen Ansatz zur **Förderpolitik aus einem Guss** aktuelle und sich abzeichnende Herausforderungen. Diese werden maßgeblich durch die Kernziele der Energiepolitik bestimmt, bis zum Jahr 2050 eine Halbierung des Primärenergieverbrauchs gegenüber 2008 und einen Anteil der erneuerbaren Energien von 60 Prozent am Bruttoendenergieverbrauch zu erreichen.² Darüber hinaus muss die Energiewirtschaft durch nahezu vollständige Dekarbonisierung dazu beitragen, dass Deutschland bis 2050 weitgehend treibhausgasneutral ist.

Vier Grundlinien definieren den Rahmen der Energieforschungspolitik in den kommenden Jahren:

- 1) Die Bundesregierung sieht in der Beschleunigung des **Technologie- und Innovationstransfers** die Voraussetzung für die effiziente, sektorübergreifende Umsetzung der Energiewende und eine dringliche Aufgabe der Energieforschungspolitik. Daher führt sie „Reallabore der Energiewende“ als neue Programmsäule ein und unterstützt den Innovationsprozess von der Technologieentwicklung bis hin zur Marktvorbereitung mit einem ganzheitlichen Ansatz. Jungen Unternehmen mit hoher Transferagilität und Innovationsdynamik wird die Teilhabe am Programm erleichtert.
- 2) Die Bundesregierung stärkt das etablierte Instrument der direkten Projektförderung zeitlich und thematisch definierter Vorhaben, das die notwendige Dynamisierung und Flexibilisierung staatlicher Förderstrategien am besten unterstützt. Das **Forschungsspektrum der Projektförderung wird erweitert**. Von den bisher einzeltechnologiezentrierten zu systemischen und systemübergreifenden Fragestellungen der Energiewende:

- Gemäß dem Leitmotiv „Efficiency First“ fokussiert die Projektförderung im Bereich *Energiewende in den Verbrauchssektoren* auf die effiziente Nutzung von Energie und Verbrauchsreduktionen. Des Weiteren soll die Integration von erneuerbaren Energien, vor allem im Gebäudesektor, gestärkt werden. Im Industriebereich nehmen energieeffiziente und CO₂-arme Industrieprozesse sowie die CO₂-Kreislaufwirtschaft eine wichtige Rolle ein.
 - Schnittstellen zum Verkehrssektor werden durch die Forschungsförderung moderner Energietechnologien wie Batterien und Brennstoffzellen, die Bereitstellung biogener und synthetischer Kraftstoffe sowie die Analyse von Rückwirkungen neuer Mobilitätskonzepte auf den Energiesektor berücksichtigt.
 - Die Forschungsförderung zur *Energieerzeugung* adressiert den gesamten Bereich der erneuerbaren Energien sowie der thermischen Kraftwerke.
 - Dem Themenkomplex *Systemintegration* sind Forschungsarbeiten zu Stromnetzen, Stromspeichern und zur Sektorkopplung zugeordnet.
 - Die Förderung *systemübergreifender Forschungsthemen* umfasst die Energiesystemanalyse, energie-relevante Aspekte der Digitalisierung, der Ressourceneffizienz, der CO₂-Technologien und der Materialforschung sowie gesellschaftliche Aspekte der Energiewende.
 - Im Bereich der nuklearen Sicherheitsforschung stehen die technisch-wissenschaftliche Begleitung des bis Ende 2022 dauernden Leistungsbetriebs der Kernkraftwerke in Deutschland, die sich daran anschließende Nachbetriebsphase, die Entsorgung der radioaktiven Abfälle, der Strahlenschutz und ein längerfristiger Kompetenzerhalt im Mittelpunkt.
- 3) Eine Besonderheit des Energieforschungsprogramms besteht in seiner Doppelstrategie der eingesetzten Förderinstrumente: Komplementär zur Projektförderung unterstützt die Bundesregierung die **institutionelle Forschungsförderung** der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. (HGF). Diese bündelt die

1 Dokumentation unter [energieforschung.de](https://www.energieforschung.de)

2 Energiekonzept 2050 unter [bmwi.de](https://www.bmwi.de)

Ressourcen der einzelnen Forschungszentren, um sie auf langfristige Forschungsziele des Staates und der Gesellschaft auszurichten und komplexe Forschungsfragen zu bearbeiten, insbesondere wenn diese den Einsatz spezifischer Großgeräte erfordern. Das neue Energieforschungsprogramm setzt hier Impulse zur wechselseitigen Ergänzung und zur besseren Vernetzung beider Instrumente und fördert so ihre gemeinsame Nutzung.

- 4) Die Bundesregierung strebt mit dem 7. Energieforschungsprogramm eine **engere internationale und europäische Vernetzung der Forschungsarbeiten** an. Auf europäischer Ebene definiert der SET-Plan umfassende Maßnahmen für energietechnische Innovationen, von der Forschung bis zur Markteinführung. Deutschland ist unter anderem an strategischen Vorhaben zu erneuerbaren Energien, smarten Energiesystemen, Energieeffizienz und nachhaltigem Transport beteiligt. Auf

globaler Ebene wirkt Deutschland an den so genannten Technologiekooperationsprogrammen der IEA mit, die das wichtigste Instrument der internationalen Zusammenarbeit bilden. Die Zusammenarbeit mit weiteren internationalen Organisationen, wie der International Renewable Energy Agency (IRENA), wird ausgebaut. In einer Reihe bi- und multilateraler Initiativen, wie z. B. der Mission Innovation (MI) oder den Abkommen für wissenschaftliche und technologische Zusammenarbeit (WTZ), wird der wissenschaftliche Austausch gefördert.

Das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung wird von den drei Bundesministerien für Wirtschaft und Energie (BMWi), Bildung und Forschung (BMBF) sowie Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) getragen und entstand unter der Leitung des BMWi. Die Bundesregierung hat erkannt, dass frühere Vorstellungen zu scharfen thematischen Abgrenzungen und zur linearen zeitlichen Abfolge

Abb. 1: Technology-Readiness-Level (TRL) im Kontext der Projektförderung im 7. Energieforschungsprogramm



Tabelle 1: 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

| Angaben in Tsd. Euro | Soll | | Regierungs-entwurf | | | Plandaten | | |
|---|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|-----------|--|--|
| | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | | | |
| BMWi | 639.700 | 725.205 | 725.798 | 723.800 | 723.745 | | | |
| Projektförderung | 595.596 | 682.980 | 682.980 | 682.980 | 682.980 | | | |
| Institutionelle Förderung (DLR) | 44.104 | 42.225 | 42.798 | 40.820 | 40.765 | | | |
| BMEL | | | | | | | | |
| Projektförderung | 46.803 | 46.803 | 46.803 | 46.803 | 46.803 | | | |
| BMBF | 506.613 | 515.601 | 528.018 | 521.809 | 521.809 | | | |
| Projektförderung | 133.427 | 133.261 | 133.355 | 133.355 | 133.355 | | | |
| Institutionelle Förderung (HGF, ohne DLR) | 373.186 | 382.340 | 394.663 | 388.454 | 388.454 | | | |
| Summe | 1.193.116 | 1.287.609 | 1.300.599 | 1.292.412 | 1.292.357 | | | |

von Innovationsprozessen den Herausforderungen dynamischer Entwicklungen im Energiebereich nicht gerecht werden. Daher hat sie für das 7. Energieforschungsprogramm eine **ressortübergreifende, themenorientierte Programmstruktur** ihrer Projektförderung gewählt und unterstreicht damit die Kohärenz der forschungspolitischen Zielsetzungen im Energiebereich. Die bewährte Arbeitsteilung der Ressorts bleibt bestehen. Sie richtet sich am Konzept des technologischen Reifegrads der zu erforschenden Themen und Technologien aus, das auch dem EU-Rahmenprogramm „Horizon 2020“ zugrunde liegt. Dieses so genannte Technology Readiness Level (TRL) gibt auf einer Skala von 1 bis 9 den wissenschaftlich-technischen Status einer Technik an. Grundsätzlich werden Projekte, die als Entwicklungsziel die TRL 1 bis 3 anstreben und damit der anwendungsorientierten Grundlagenforschung zuzuordnen sind, vom BMBF gefördert. Das BMWi ist für die anwendungsnäheren Forschungsarbeiten ab TRL 3 zuständig. Das BMEL fördert themenspezifische anwendungsnahe Forschungsarbeiten ab TRL 3 zur energetischen Biomassennutzung. Dem Instrument der Reallabore, mit dem marktnahe Entwicklungen gefördert werden sollen, liegen die TRLs von 7 bis 9 zugrunde.

Die Bundesregierung stellt im Rahmen ihres 7. Energieforschungsprogramms in den Jahren 2018 – 2022 insgesamt rund 6,4 Milliarden Euro für die Forschung, Entwicklung,

Demonstration und Erprobung zukunftsfähiger Technologien und Konzepte zur Verfügung. Das entspricht gegenüber der Vergleichsperiode 2013 – 2017 einer Steigerung von rund 45 Prozent. Dabei setzt sich auf Bundesebene die staatliche Forschungsförderung im Energiebereich aus Mitteln des Bundeshaushalts und des Sondervermögens „Energie- und Klimafonds“ (EKF) zusammen. Letztere werden im Energieforschungsprogramm ausschließlich für die direkte Projektförderung im nichtnuklearen Bereich verwendet, i.d.R. zur Umsetzung von Großprojekten mit besonderer Multiplikatorwirkung für die Energiewende.

Ressortzuständigkeiten und Budgetverantwortungen in der Projektförderung und der institutionellen Förderung im 7. Energieforschungsprogramm sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Daten der Tabelle basieren auf dem Haushaltsgesetz 2018 sowie dem Regierungsentwurf zum Bundeshaushalt 2019 und dem Finanzplan bis 2022 vom 06.07.2018. Der gewählte Zeitraum orientiert sich an der Finanzplanung des Bundes und steht in keinem Zusammenhang mit der unbefristeten Rahmenprogrammlaufzeit. In den kommenden Jahren ist mit Änderungen zu rechnen. Die Budgetdarstellung steht unter dem Vorbehalt der Verfügbarkeit der Haushaltsmittel.

2. Einleitung



Enérgeia (auf Deutsch *Wirksamkeit*) wurde als Begriff durch Aristoteles eingeführt und bezeichnet im philosophischen Sinne die Wirkkraft, durch die Möglichen in Seiendes übergeht. So steht die zielgerichtete Energiebereitstellung und -nutzung am Anfang der menschlichen Zivilisation und ist bis heute Motor wirtschaftlichen Handelns. Das schöpferische Potenzial der Energie wussten Menschen also seit langer Zeit zu ihrem Vorteil einzusetzen. Aber erst mit der industriellen Revolution stieg der Energieverbrauch pro Person stark an. Der kontinuierliche Fortschritt der Energietechniken ging dabei Hand in Hand mit steigendem Wohlstand und gesellschaftlichen Entwicklungen. In den letzten Dekaden rückten Risiken der Ressourcenverfügbarkeit, ins-

besondere aber Auswirkungen auf Klima und Umwelt zunehmend in den Fokus und stellten das auf fossilen Energieträgern basierende Energiesystem in Frage. Mit dem Übereinkommen der UN-Klimakonferenz von Paris im Jahr 2015 hat sich die Weltgemeinschaft erstmals verpflichtet, den Anstieg der Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu halten und Anstrengungen zu unternehmen, den Anstieg auf 1,5 °C zu begrenzen. Dies erfordert vor allem ein Umdenken in allen Facetten des Energiesystems. Die Geschichte jedoch zeigt: Energiewenden passieren nicht von heute auf morgen. Obschon der strategische Wechsel hin zu erneuerbaren Energieträgern heute weitgehend als notwendig erkannt wird, ist es schwierig, ihn zu vollziehen.

2.1 Energiepolitische Herausforderungen

Die Analyse der weltweiten Ausgangslage in der Energie- und Klimafrage verdeutlicht das Ausmaß des angestoßenen Transformationsprozesses. Seit Beginn des Maschinenzeitalters im 19. Jahrhundert steigt der weltweite Primärenergieverbrauch kontinuierlich an, was die Lebensqualität vieler Menschen stark verbessert hat. Mit einem weiteren Anstieg des globalen Energieverbrauchs ist zu rechnen, da einerseits viele Menschen noch sehr wenig Energie verbrauchen und andererseits die Weltbevölkerung weiter zunimmt. Die eigentliche Herausforderung besteht jedoch darin, dass immer noch 81 Prozent des Weltenergieverbrauchs durch fossile Energieträger gedeckt werden. Sonne und Wind weisen zwar sehr große Potenziale auf. Sie decken bislang aber weniger als zwei Prozent des Energieverbrauchs ab. Der Status quo steht also in deutlichem Gegensatz zu den Anforderungen und Verpflichtungen des internationalen Klimaschutzes und verlangt nach deutlichen Fortschritten auf allen Ebenen.

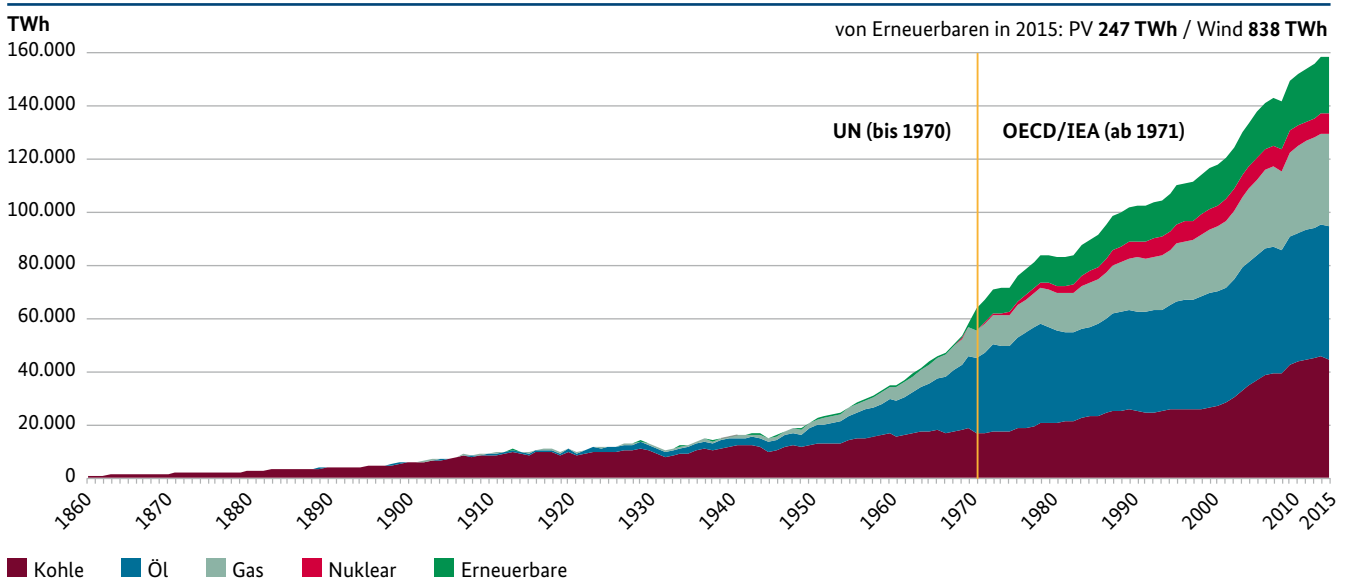
Die Bilanz für Deutschland fällt günstiger aus: Der Primärenergieverbrauch entwickelte sich im Vergleich zu 1990 rückläufig, der Anteil erneuerbarer Energien ist in den Vorjahren gestiegen. Das ist nicht zuletzt Ergebnis der Neuausrichtung der Energiepolitik und der damit einhergehenden Umsteuerung in der Energiewirtschaft. Die über Jahrzehnte unangefochtene Position fossiler und nuklearer Energieträger hat sich grundlegend verändert. Die verlässliche und umweltverträgliche Bereitstellung von Energie zu bezahlbaren Preisen und ihr effizienter Einsatz bilden heute die Grundlage der deutschen Wirtschafts- und Energiepolitik.

Doch trotz aller Erfolge stehen wir vor der gewaltigen Aufgabe, die Energielandschaft einer modernen, industriegeprägten Volkswirtschaft in den kommenden Jahrzehnten tiefgreifend umzugestalten. Die Bundesregierung hat mit ihrem Energiekonzept die Weichen für die zukünftige Energieversorgung in Deutschland gestellt und das zentrale Ziel formuliert, bis 2050 die Treibhausgasemissionen um mindestens 80 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 zu senken.

Den marktorientierten Ausbau erneuerbarer Energien beschleunigen

Mit der Dekarbonisierung des Energiesystems setzt die Politik auf den Einsatz regenerativer Energieträger wie Wind- und Sonnenenergie in der Stromproduktion, Biomasse und Erdwärme in der Wärmebereitstellung sowie auf Elektromobilität, alternative Antriebe und einen Kraftstoffmix mit u.a. synthetischen Kraftstoffen im Verkehrssektor. Aktuell läuft dieser Transformationsprozess in den einzelnen Sektoren mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ab. Während die Erfolge im Stromsektor deutlich sichtbar sind, machen der Wärme- und Verkehrssektor nur langsame Fortschritte. Eine integrierte Betrachtung – bis hin zur intelligenten Kopplung der Sektoren Wärme, Mobilität und Elektrizität in Verbindung mit Speichertechnologien – könnte diesen Trend beschleunigen und dazu beitragen, dass das Ziel, 60 Prozent des Bruttoendenergieverbrauchs aus erneuerbaren Energien bereitzustellen, bis zum Jahr 2050 erreicht wird.

Abb. 2: Primärenergieerzeugung der Welt von 1860 bis 2015*



* Daten von 1860 bis 1949 aus United Nations (1956) auf Basis von Regul (1937), von 1950 bis 1970 aus United Nations (1976), ab 1971 aus OECD/IEA (2017). Daten für die erneuerbare Erzeugung umfassen bis 1970 nur Wasserkraft.

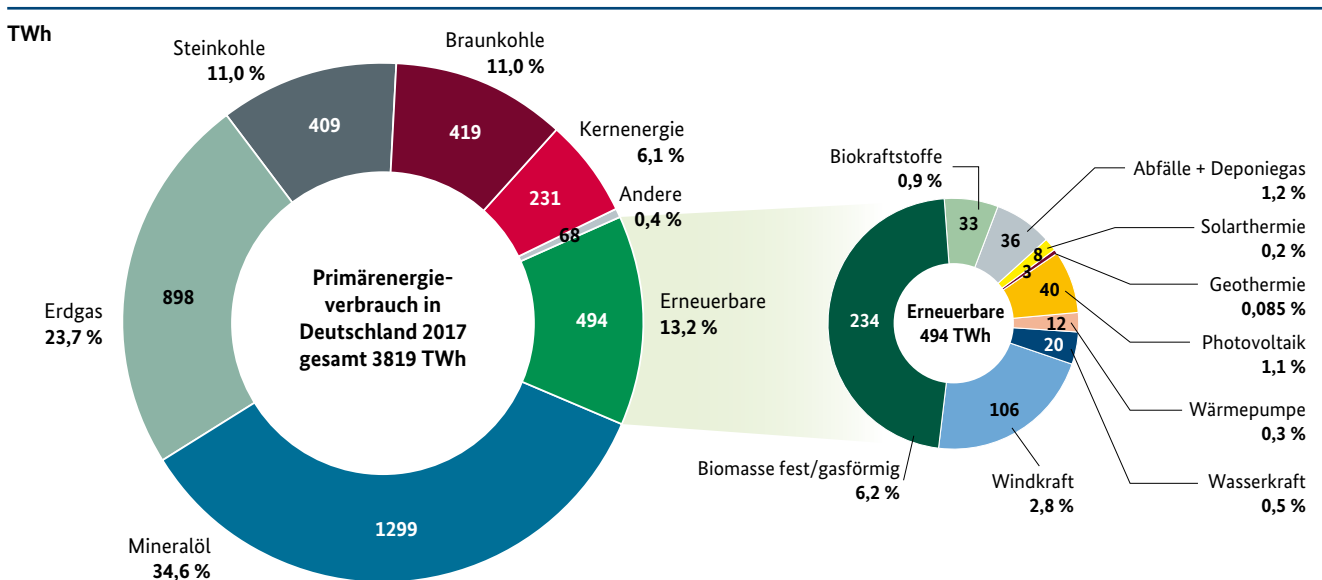
Quellen: REGUL, Dr. Rudolf, 1937. Energiequellen der Welt: Betrachtungen und Statistiken zur Energiewirtschaft. In: Schriften des Instituts für Konjunkturforschung. Sonderheft 44, S. 1-78.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, 1956. World Energy Requirements in 1975 and 2000. In: Proceedings of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy: Volume 1: The World's Requirement for Energy: the Role of Nuclear Power. Genf, 8.-21. August 1955. S. 3-33. UN Reference Code S-1057-0032-01.

UNITED NATIONS, Statistical Office, 1976. World Energy Supplies 1950 - 1974. New York, United Nations Publication. Statistical Papers. Series J, Number 19. UN Sales Number E.76.XVII.5.

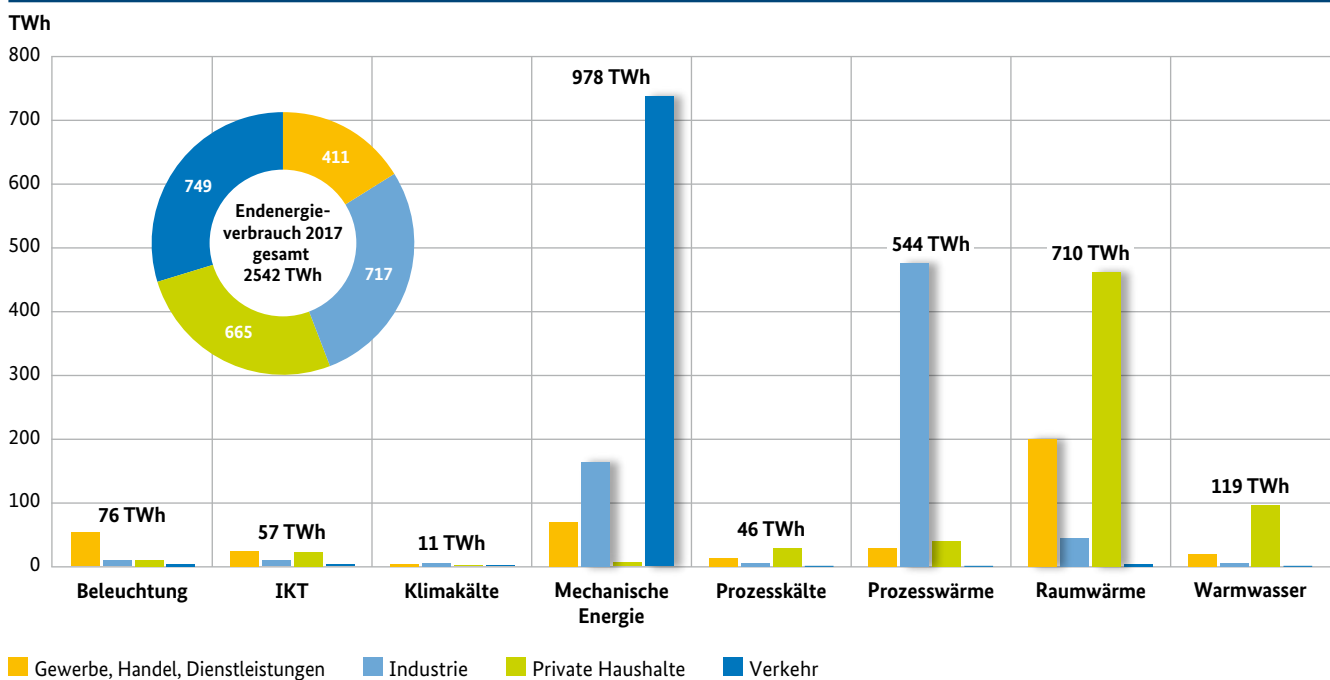
OECD/IEA, 2017. IEA Headline Global Energy Data (2017 Edition). In: World Energy Balances (2017 Edition). Paris, IEA Publishing. Verfügbar unter: https://www.iea.org/media/statistics/IEA_HeadlineEnergyData_2017.xlsx

Abb. 3: Primärenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2017



Quelle: BMWi Energiedaten 01/2018

Abb. 4: Endenergieverbrauch in Deutschland im Jahr 2017 nach Sektoren und Anwendungen



Quelle: AG Energiebilanzen

Die Energieeffizienz auf allen Systemebenen anheben

Hohe Anteile erneuerbarer Energien an der Energieversorgung können nur dann erreicht werden, wenn gleichzeitig der Energieverbrauch drastisch reduziert wird. Dies ohne negative Rückwirkungen auf den Wohlstand einer modernen Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft und auf die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft umzusetzen, kann nur durch deutliche Steigerung der Energieeffizienz in allen Nachfragesektoren erfolgen. „Efficiency First“ ist daher ein zentrales Leitmotiv deutscher Energiepolitik. Es ist zugleich Grundlage für eine wachsende Energieproduktivität unserer industriebasierten Volkswirtschaft. Dazu erarbeitet die Bundesregierung eine ambitionierte und sektorübergreifende Energieeffizienzstrategie mit dem Ziel, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 um 50 Prozent gegenüber 2008 zu senken.

Die Energieinfrastruktur klug nutzen

Eine Besonderheit der Energiewirtschaft besteht im Geflecht der über Jahrzehnte gewachsenen, langlebigen

und kapitalintensiven Energieinfrastruktur wie Förderanlagen, Kraftwerke, Pipelines, Leitungsnetze oder Speicher. Sie verlängern den erforderlichen Anpassungszeitraum an neue Versorgungsstrukturen. Um dem Transformationsprozess vor allem in der Übergangsphase mehr Dynamik zu verleihen, sind innovative, an den Zielen der Energiewende orientierte Nutzungskonzepte für vorhandene Infrastrukturen und ihre kluge Vernetzung mit neuen Anlagen notwendig. Sie können die Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit der Energiewende verbessern. Besondere Bedeutung haben dabei die Modernisierung und der Ausbau der Stromnetze. Zudem gilt es, die Synergien und Flexibilitätsoptionen der Sektorkopplung, die Einbindung von Speichertechnologien sowie Dezentralisierungsmöglichkeiten zu nutzen.

Die Sicherheit der Energieversorgung gewährleisten

Wirtschaft und Gesellschaft sind auf eine zuverlässige Energieversorgung angewiesen. Dies setzt einerseits die dauerhafte Verfügbarkeit technisch und wirtschaftlich nutzbarer Energieformen voraus. Andererseits ist mit

zunehmender fluktuierender Einspeisung und digitaler Vernetzung die technische Robustheit und Resilienz des Versorgungssystems eine strategisch wichtige Aufgabe mit wirtschafts-, sicherheits- und gesellschaftspolitischer Relevanz. In Zukunft wird es darauf ankommen, die notwendige Balance zwischen digitalem Fortschritt, gesellschaftlicher Akzeptanz und Risikominimierung herzustellen.

Den Umwelt- und Klimaschutz voranbringen

Um die Sicherheit der Energieversorgung langfristig zu gewährleisten, ist sie dauerhaft mit dem Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen und des Klimas in Einklang zu bringen. Die Substitution fossiler und nuklearer Energieträger durch erneuerbare wird dazu wichtige Beiträge liefern. Neben den dringenden Aufgaben zur Minderung der Treibhausgasemissionen und lokalen Luftreinhaltung sind Fragen der Ressourcen- und Materialeffizienz sowie des Umwelt- und Naturschutzes essenziell für die Bewertung der Zukunftsfähigkeit moderner Energie- und Effizienztechnologien.

Die gesellschaftlichen Auswirkungen im Blick behalten

Technologischer Fortschritt geht einher mit gesellschaftlichen Veränderungen. Während positive Effekte schnell im Alltag implementiert werden, sind die Unsicherheiten des Wandels wie Beschäftigungseffekte, Auswirkungen auf Wohlstand oder Gesundheit sowie Akzeptanzfragen und Verhaltensänderungen Themen, die Menschen im Kontext der Energiewende stark bewegen. Eine besondere gesellschaftliche Relevanz haben Prozesse des Strukturwandels in traditionellen Energieregionen. Geographisch stark konzentriert, werden hier die Folgen des Transformationsprozesses intensiver erlebt. Denn sie berühren unter anderem die Zukunftsfähigkeit regionaler Wirtschafts- und Erwerbsmodelle sowie Kulturlandschaften. Auch wenn es vorrangig Aufgabe der Wirtschafts- und Industriepolitik ist, regionale Zukunftsperspektiven zu schaffen und den Wandel gesellschaftsverträglich zu gestalten, so hat die Energiepolitik eine besondere Gestaltungsverantwortung.

2.2 Strategische Ziele der Energieforschungspolitik

Als Kernelement der Energiepolitik orientiert sich die öffentlich geförderte Energieforschung an den politischen Zielen der Bundesregierung und adressiert große Herausforderungen der Energiewende.

Um diese Ziele zu erreichen und den dazu notwendigen Transformationsprozess zu optimieren, ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung bestehender Technologien notwendig. Zudem gilt es verstärkt, neue innovative Ideen zu verwirklichen und diese neuen technischen und nicht-technischen Innovationen auch erfolgreich in den Markt einzuführen.

- **Die Energiewende voranbringen**

Das Kernziel der Forschungsförderung besteht darin, innovative ganzheitliche Lösungen für die Herausforderungen der Energiewende zu entwickeln und rasch an den Markt zu führen. Dies soll durch einen breiten Förderansatz entlang der gesamten Energiekette und durch die besondere Fokussierung auf den Ergebnis-

transfer unterstützt werden. Dabei stehen neben den technischen auch die nicht-technischen Dimensionen der Energiewende wie gesellschaftliche Prozesse oder innovationsfreundliche Rahmenbedingungen sowie ihre Wechselwirkung im Fokus. Eine besondere Priorität haben innovative Technologien und Konzepte, die zu deutlichen Fortschritten bei der Effizienzsteigerung und der Integration erneuerbarer Energien in den Nachfragesektoren beitragen können. Dabei wird den komplexen Aufgaben im Wärmesektor (Raumwärme und Prozesswärme) ein hoher Stellenwert beigemessen.

- **Den Industriestandort stärken**

Die Forschungsförderung im Energiebereich leistet wichtige Beiträge zur Modernisierung der deutschen und europäischen Wirtschaft sowie zur Sicherung des Industriestandorts. Dabei geht es darum, neue Trends wie die Digitalisierung sinnvoll aufzugreifen, Technologiekompetenzen im Energiebereich zu erhalten und auszubauen sowie die Exportchancen für innovative

Energietechnologien zu verbessern. Daher wird die Forschungsförderung auch an Technologien für die Weltmärkte, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern, ausgerichtet. Dabei kommt der Aktivierung von Innovationspotenzialen in kleinen und mittelständischen sowie jungen Unternehmen eine besondere Rolle zu.

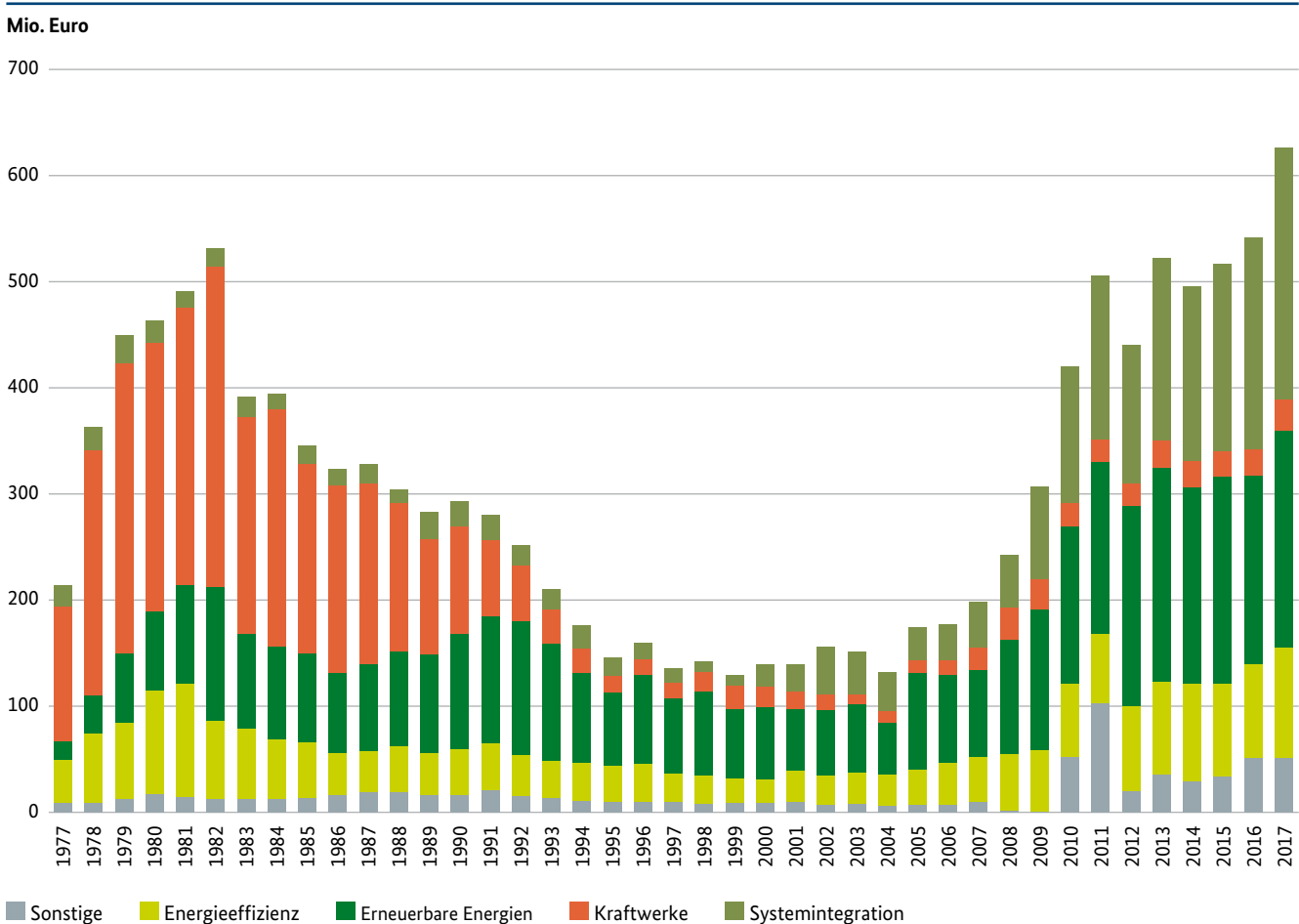
● **Gesamtgesellschaftliche Risikoversorge**

Durch den technologieoffenen Programmansatz trägt die Energieforschung dazu bei, ein breites Spektrum an Technikooptionen für den Transformationsprozess im Energiebereich rechtzeitig zu entwickeln und für die Anwendung bereitzustellen. Dies schafft die erforderlichen Gestaltungsspielräume, um in Zukunft auf heute nicht absehbare Entwicklungen reagieren zu können. Da Klima- und Umweltauswirkungen nicht vor Staatsgren-

zen haltmachen, sind hocheffiziente und erneuerbare Energietechnologien und Systemlösungen auch unter dem Aspekt zu entwickeln, zu Problemlösungen weltweit beitragen zu können.

Solche langfristig angelegten übergeordneten Zielsetzungen liegen jenseits betriebswirtschaftlicher Sichtweisen und Zeiträume. Daher ist insbesondere im strategisch wichtigen Energiebereich staatliches Engagement erforderlich, um innovativen Technologien von der Entwicklung über die Erprobung bis hin zur Marktdurchdringung und gesellschaftlicher Akzeptanz den Weg zu ebnen. Dabei sind bekannte „Marktdefizite“ in Bezug auf spezifische Herausforderungen wie lange Zeithorizonte technologischer Innovationen oder hohe wirtschaftliche und technologische Risiken auszugleichen.

Abb. 5: Projektförderung nicht-nukleare Energieforschung in Deutschland von 1977 bis 2017 (inflationsbereinigt, Basisjahr 2010)



Quelle: Projektträger Jülich, profi-Datenbank

2.3 Rahmen und Struktur der Energieforschungspolitik

Erstmals in den 1970er Jahren legte die Bundesregierung Ziele, Schwerpunkte und Förderinstrumente ihrer Energieforschungspolitik in einem mehrjährigen Programm fest. Seitdem wird es regelmäßig fortgeschrieben, um Neuausrichtungen der Energiepolitik, technologische Fortschritte und thematische Erweiterungen aufzugreifen. Die nun 7. Auflage des Programms ist an der Energiewende ausgerichtet und wurde unter Leitung des federführenden Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) erstellt. Die Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF) sowie Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sind an dem Programm mit eigenen Zuständigkeiten beteiligt.

Die Bundesregierung hat Einzelbeispiele ressortübergreifender Initiativen ausgewertet und Erkenntnisse darüber gewonnen, wie sich der technische Fortschritt in vielen Bereichen des Energiesystems vollzieht. Charakteristisch sind vor allem eine zunehmende Entwicklungsgeschwindigkeit, Überlappungen von Innovationsphasen sowie themen- und branchenspezifische Wechselwirkungen als Innovationstreiber.

Vor diesem Hintergrund hat sie für das 7. Energieforschungsprogramm eine **ressortübergreifende und themenorientierte Programmstruktur** gewählt, um einer Fragmentierung entgegenzuwirken. Die Ressortzuständigkeiten einschließlich der Budgetverantwortung bleiben dabei unverändert und werden in der Projektförderung anhand der TRL-Systematik einem Technologiereifegrad von 1 bis 9 zugeordnet. Als Richtgröße wird der im Projekt angestrebte Technologiereifegrad herangezogen, wobei aufgrund der Komplexität und der Unsicherheiten, die einem Innovationsprozess innewohnen, bei den Phasenübergängen an den Meilensteinen zu TRL 3 und TRL 7 Unschärfen der Zuordnung zugelassen sind.

Aus diesem Ansatz heraus folgt die Aufgabenzuordnung im 7. Energieforschungsprogramm wie folgt:

- Das **BMWi** ist für die programmatische Ausrichtung der Energieforschungspolitik der Bundesregierung federführend zuständig und verantwortet die Projektförderung der anwendungsnahen Energieforschung ohne Biomasse (TRL 3-9). In der institutionellen Förderung erstellt das BMWi in Abstimmung mit den zuständigen Ressorts die forschungspolitischen Vorgaben für den Forschungsbereich Energie der HGF und ist für die Energieforschung

des DLR zuständig. Das BMWi vertritt Deutschland in internationalen und europäischen Gremien der Forschungspolitik im Energiebereich und fördert projektbezogen multilaterale Forschungsk Kooperationen.

- Das **BMBF** ist zuständig für die Projektförderung im Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung im gesamten Themenspektrum des Programms (TRL 1-3). Das BMBF verantwortet die gesamte institutionelle Förderung des Forschungsbereichs Energie der HGF ohne das DLR und wirkt bei den forschungspolitischen Vorgaben für den Forschungsbereich Energie der HGF mit. Zudem fördert das BMBF den wissenschaftlichen Nachwuchs sowie den akademischen Austausch und wissenschaftliche Kooperationen, sowohl auf EU-Ebene als auch mit internationalen Partnern.
- Das **BMEL** ist zuständig für die Projektförderung der energetischen Biomassenutzung (TRL 3-7).

Die neue Programmstruktur stärkt die bewährte Arbeitsteilung unter den Ressorts durch neue Möglichkeiten zur **Synergienutzung in themenorientierten Kooperationen**. So kann das Programm in besonders dynamischen Bereichen der Energiewende seine innovationsfördernde Wirkung stärker entfalten und einen hohen Mehrwert eines „Forschungseuros“ generieren. Zudem befördert diese neue Themenorientierung die europäische und internationale Vernetzung auf der Programmebene. Der Synergien- und Kooperationsansatz findet somit auch an Schnittstellen der Energieforschung zu Technologieprogrammen anderer Politikbereiche mit peripherem Energiebezug Anwendung, beispielsweise in der Industrie-, Bau-, Verkehrs- und Klimapolitik. Themenspezifische Hinweise zu solchen Schnittstellen sowie zur europäischen Programmvernetzung finden sich in den Fachkapiteln.

Eine wichtige Rolle spielt die Zusammenarbeit mit Bundesressorts, die für stark energieabhängige Aufgabenbereiche federführend zuständig sind, u. a. das Ressort für Verkehr und digitale Infrastruktur, und eigene Programme zur Einführung zukunftsfähiger Lösungen in die Praxis fördern. Bei Maßnahmen des Energieforschungsprogramms mit unmittelbarem Bezug dazu findet eine enge Abstimmung statt.

Die Bundesregierung setzt bei der Entwicklung und Umsetzung von Förderstrategien für die Energieforschung auf einen transparenten Dialog mit allen relevanten Akteuren in diesem Bereich. Auf diese Weise wird die Koordination von Forschungsaktivitäten abgesichert, ein hoher Praxisbezug von Forschung und Entwicklung sichergestellt und der Transfer von Innovationen in die Energiewirtschaft unterstützt. Hierfür hat die Bundesregierung Strukturen eingerichtet, die diesen Austausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik fördern:

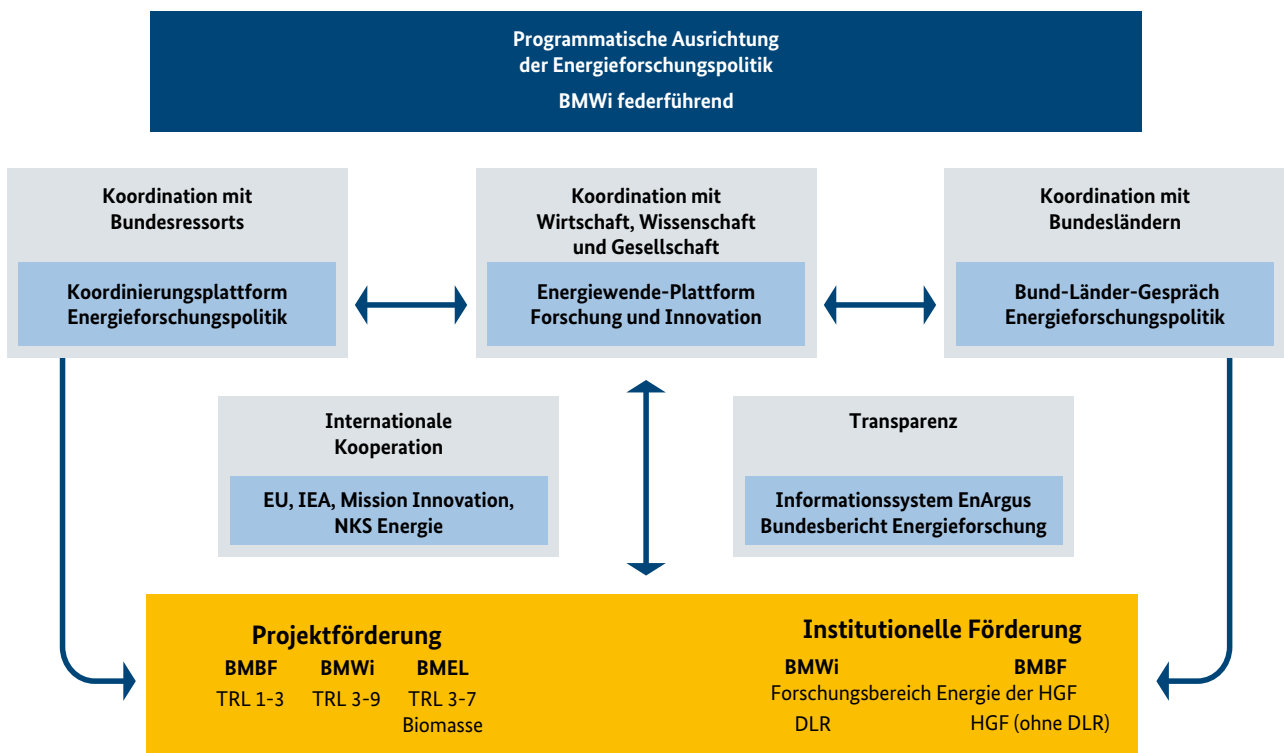
- Die Energiewende-Plattform Forschung und Innovation (*FuI-Plattform*) dient als strategisches Beratungsgremium zu übergreifenden Fragen der Förderpolitik in der Energieforschung. Mitglieder des Plenums sind Institutionen aus Politik, Energiewirtschaft, Forschung und Gesellschaft.
- Die *FuI-Plattform* wird fachlich getragen durch die Arbeit der *Forschungsnetzwerke Energie*. Sie stehen allen interessierten Fachleuten offen und werden durch die Akteure selbst organisiert und gestaltet. Derzeit engagie-

ren sich rund 3.500 Mitglieder. Auch das Akademienprojekt *ESYS* speist seine Ergebnisse in die *FuI-Plattform* ein.

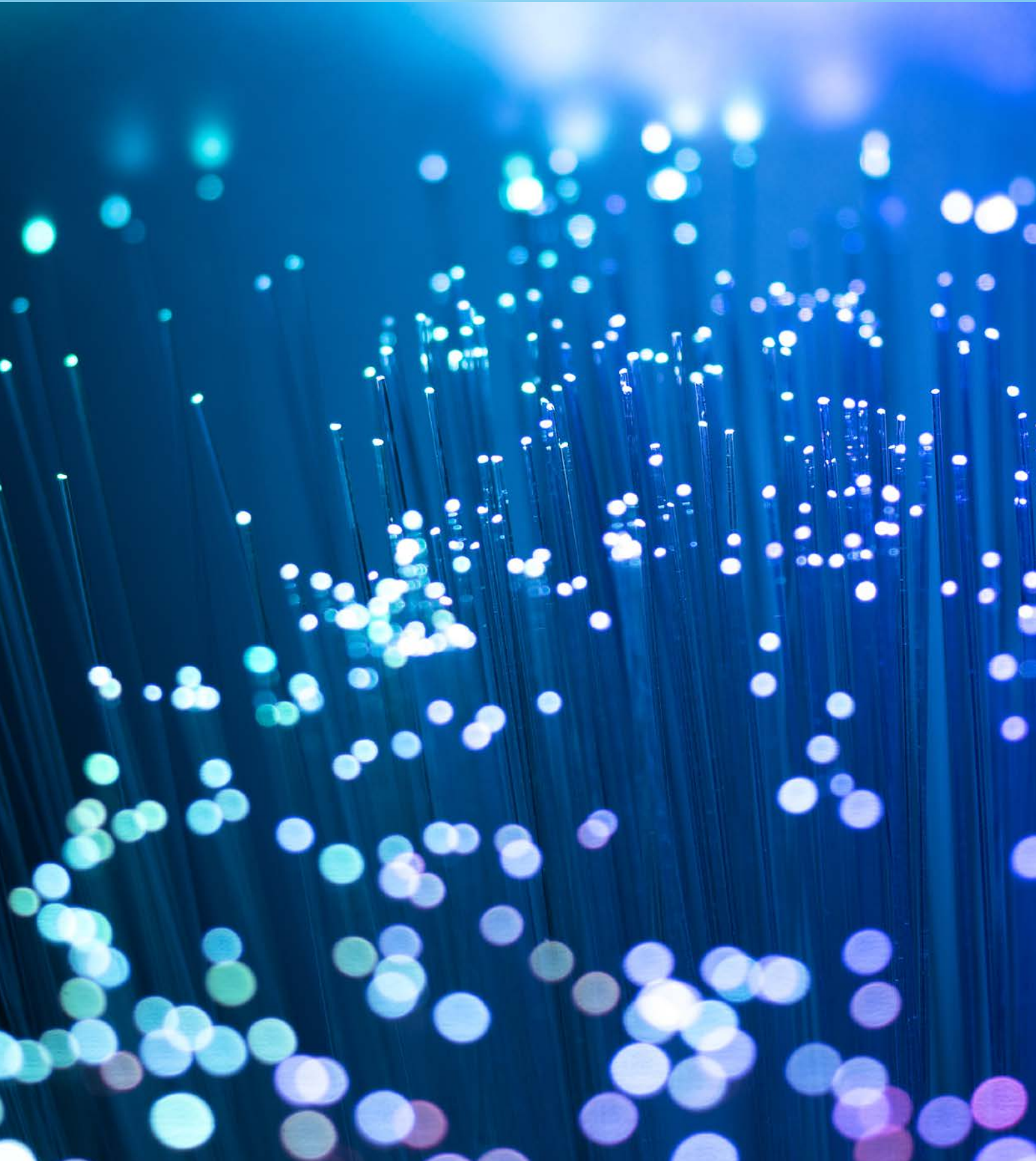
- Durch den gemeinsamen programmatischen Ansatz steigt die Notwendigkeit regelmäßiger Abstimmung und Koordination der am 7. Energieforschungsprogramm beteiligten Ressorts. Die etablierte „Koordiniierungsplattform Energieforschung“ wird daher gestärkt und anlassbedingt erweitert.
- Durch das jährliche „Bund-Länder-Gespräch Energieforschung“ wird der Austausch mit den Bundesländern intensiviert und die Zusammenarbeit in ausgewählten Bereichen ausgebaut.

Das 7. Energieforschungsprogramm leistet Beiträge zur High-Tech-Strategie der Bundesregierung, zur Umsetzung des nationalen Klimaschutzplans 2050, zum Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzelle sowie zum NECP im Rahmen der Energieunion in der EU. Das Programm steht zudem im Kontext der Effizienzstrategie sowie der Digitalisierungsstrategie der Bundesregierung.

Abb. 6: Strukturen der Energieforschung



3. Fokus: Technologie- und Innovationstransfer



3.1 Reallabore der Energiewende

Nach wichtigen Fortschritten in vielen Bereichen tritt nun die Energiewende in eine neue Phase ein. Während zunächst vor allem der Ausbau der erneuerbaren Energien und der Effizienztechnologien im Vordergrund stand, rücken nun verstärkt systemische Fragen in den Fokus. Energieerzeugung und Verbrauch können nicht mehr losgelöst voneinander betrachtet werden, sondern müssen in einem vernetzten Energiesystem zusammen gedacht werden. So sind etwa die Entwicklung intelligenter Energieinfrastrukturen, ihre Vernetzung in Quartieren, die Sektorkopplung oder die Digitalisierung Themen, die sich unter künstlichen Bedingungen im Laborraum nicht ausreichend erforschen lassen. Die zunehmende Vernetzung des Energiesystems auf allen Ebenen und die neue aktive Rolle, die vielen Akteuren im Rahmen der Energiewende zukommt, erfordern eine Weiterentwicklung der bisherigen Forschungsförderstrategien. Neue Förderformate sollen dabei den Wandel von geförderten Einzeltechnologien hin zu einer systemischen Ausrichtung der Forschungsförderung signalisieren, die auch die gesellschaftlichen Auswirkungen der Energiewende berücksichtigt. Aus diesem Grund sollen in Zukunft sowohl innovative Technologien als auch integrale Energiekonzepte mit dem Ziel einer weitgehenden Dekarbonisierung in zeitlich und räumlich begrenzten Experimentierräumen unter realen Bedingungen marktnah und im systemischen Zusammenspiel erprobt werden. Mit dem neuen Energieforschungsprogramm wird die Bundesregierung deshalb Reallabore der Energiewende als neue Säule der Forschungsförderung etablieren. Diese werden nicht nur größer und thematisch umfassender als bisherige Demonstrationsprojekte ausgelegt. Sie eröffnen auch, wo sinnvoll, Wege zum „regulatorischen Lernen“. So können technologische und regulatorische Erkenntnisse in der Praxis wechselwirken und systemische Optimierungspotenziale aufzeigen. Möglichkeiten für dafür notwendige legislative Maßnahmen wie Experimentierklauseln in Gesetzen und Verordnungen oder Ausnahmegenehmigungen werden in Anlehnung an das Forschungsgutachten „Potenziale und Anforderungen regulatorischer Experimentierräume (Reallabore)“ erarbeitet.

Die Reallabore der Energiewende werden die für die deutsche Energiepolitik wesentlichen systemischen Herausforderungen in klar umrissenen Großvorhaben exemplarisch angehen. Sie haben Pioniercharakter für die Transformation des Energiesystems und widmen sich Forschungsfragestellungen, die eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung

der Energiewende innehaben. Dazu zählen zunächst Sektorkopplungs-Technologien wie Elektrolyse-Großanlagen mit Abwärmenutzung in Netzengpassgebieten, große thermische Speicher zur CO₂-freien, nachhaltigen Nutzung bestehender Energieinfrastrukturen, Technologien zur CO₂-Nutzung oder die intelligente Vernetzung von Energieinfrastruktur in klimaneutralen Stadtquartieren. Dabei soll das Förderformat der Reallabore dynamisch an die gesellschaftlichen Entwicklungen vor Ort angepasst werden. In Regionen, die von Strukturwandel und sinkenden Bevölkerungszahlen geprägt sind, unterscheiden sich die Herausforderungen von denen in wachsenden, hoch verdichteten Großstädten. Die Reallabore der Energiewende sollen ganzheitliche Lösungen entwickeln, erproben und bekannt machen. Reallabore sollen Querschnittsprojekte sein, deren Zielstellungen die Menschen vor Ort verstehen und mittragen. So entsteht ein notwendiger Grundkonsens für den erfolgreichen Transfer aus der Forschung in die Anwendung.

Grundlage für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Lösungen sind starke Partnerschaften von Unternehmen, die innovative Energietechnologien und Konzepte in den Markt bringen wollen, aber auch lokale Akteure, die die Herausforderungen in der Region oder im Quartier kennen. Hinzu kommen wissenschaftliche Institutionen, die den Transfer von Forschungsergebnissen vorbereiten und die Umsetzung des Reallabors wissenschaftlich begleiten. Der Beteiligung kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) sowie Startups kommt dabei eine wichtige Rolle zu.

Die Umsetzung der Reallabore als neue Säule der Energieforschung wird schrittweise erfolgen. Weitere Maßnahmen, insbesondere in Bezug auf die Möglichkeit von Anpassungen der regulatorischen Rahmenbedingungen, werden Zug um Zug unter Berücksichtigung der gewonnenen Erfahrungen und der sich dynamisch entwickelnden Randbedingungen erfolgen.

Die Reallabore der Energiewende sind zwar ein neues Förderformat. Sie bauen jedoch teilweise auf Erfahrungen aus der Umsetzung bisheriger Förderinitiativen im Kontext der Energieforschung auf wie *SINTEG*, *Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt* und die auf die Grundlagenforschung ausgerichteten *Kopernikus-Projekte*. Die *Kopernikus-Projekte* werden parallel dazu weiterentwickelt und auf zentrale Lösungsoptionen für die Energiewende fokussiert.

3.2 Startups: neue Akteure der Energiewende

Das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung setzt in seiner Projektförderung auf ein Partnermodell: Wissenschaftliche Kreativität aus Forschungsinstituten und Hochschulen, die Innovationskraft von KMU sowie die Infrastruktur und Erfahrung von Großunternehmen ergänzen sich in Verbundprojekten, die mit ganzheitlichen Aufgabenstellungen die gesamte Kette von der Grundlagenforschung über die anwendungsnahe Forschung bis hin zur Markteinführung abdecken. Trotz vieler guter Ergebnisse dieser partnerschaftlichen Zusammenarbeit in der Vergangenheit muss das Innovationstempo zum Gelingen der Energiewende beschleunigt werden. Dabei kommt der Kooperation mit Startup-Unternehmen eine Schlüsselrolle zu, denn sie lässt neue Ideen entstehen und kann den Innovationstransfer verbessern.

Die zunehmende Komplexität des Energiesystems und der Energiewirtschaft erfordern unternehmerische Fähigkeiten wie Agilität und Experimentierfreude für substanzielle Marktinnovationen. Auch nicht-technische Innovationen haben im Kontext der Digitalisierung der Energieversorgung eine große Bedeutung. Dazu kann auch die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle einen Beitrag leisten.

Damit verbunden ist der hohe Stellenwert von Startups als Innovationstreiber. Sie tragen zur Entwicklung neuartiger technologischer Lösungen bei, erschließen mit innovativen und teilweise unkonventionellen Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen neue Märkte und sind so ein wichtiger Impulsgeber der Energiewende. Sie agie-

ren oft in technologieübergreifenden Forschungsfeldern wie der Sektorkopplung oder der Digitalisierung, befassen sich jedoch auch mit sozioökonomischen Fragestellungen und erproben innovative Entwicklungen und Ergebnisse in einem praxisnahen Umfeld. Daher ist das neue Förderformat der Reallabore für Startups von besonderem Interesse. Es ermöglicht ihnen, ihre neu entwickelten, oft nahezu marktreifen Produkte in einem flexiblen Rahmen zu testen.

Startups agieren sehr fokussiert, dynamisch und unter Erfolgsdruck ihrer Investoren. Die klassischen Instrumente und Mechanismen der Projektförderung sind bisher jedoch kaum auf diese Akteure zugeschnitten. Ohne eine bessere Einbindung von Startups in die Energieforschung blendet man allerdings einen wichtigen Innovationstreiber aus. Daher ist es Ziel der Bundesregierung, Startups mit neuen und angepassten Förderformaten besser anzusprechen und ihre Beteiligung in allen Themenfeldern der Energieforschung zu erhöhen. Dafür werden bestehende Hemmnisse sukzessive abgebaut: Einerseits durch die inhaltliche Ausweitung des Programms auf nicht-technische Innovationen (Geschäftsmodelle, neue Dienstleistungen) mit Bezug zu technischen Neuerungen. Andererseits durch die Anpassung und Beschleunigung der administrativen Verfahren mit einer Reihe neuer Bausteine, wie spezifischer Startup-Beratung, der Möglichkeit eines „Fast Track“ (beschleunigtes Antragsprozedere) durch neue, agilere Projektzuschnitte und Wettbewerbsformate sowie die neue Vernetzungsplattform *Forschungsnetzwerk Startups*.

3.3 Austausch und Vernetzung: Energiewende-Plattform Forschung und Innovation und Forschungsnetzwerke Energie

Die Energiewende-Plattform Forschung und Innovation (*FuI-Plattform*) führt unter Beteiligung aller betroffenen Ressorts auf Bundes- und Landesebene hochrangige Akteure aus Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft zusammen. Gemeinsam diskutieren und bewerten sie aktuelle Entwicklungen und Forschungsstrategien. Auch das grundlagenorientierte Akademien-Projekt *Energiesysteme der Zukunft (ESYS)* speist seine Ergebnisse

ein und soll weiterentwickelt werden. So integriert die *FuI-Plattform* alle drei Säulen der Energieforschung, von der Grundlagenforschung, über die angewandte Forschung bis zu marktnahen Reallaboren.

Fachliche Grundlage der Energiewende-Plattform Forschung und Innovation sind die *Forschungsnetzwerke Energie*. In den offenen Experten-Netzwerken wird von den rund 3.500 Mit-

gliedern ein Vernetzungsgewinn generiert, der die Qualität der Forschungsergebnisse sichert und einen kontinuierlichen Erkenntnisfortschritt und Praxistransfer begründet.

Die zunehmende Komplexität unseres Energiesystems erschwert die Frage nach dem für die Energiewende besten Technologie- und Instrumentenmix. Der Austausch zwischen Experten mit komplementären Kompetenzen in operativen und strategischen, fachlichen und methodischen Fragen kann dazu Antworten finden. Die *Forschungsnetzwerke Energie* setzen darauf, diese Experten aus Forschung und Wirtschaft zu verschiedenen Themenschwerpunkten zusammenzubringen und ihren Erfahrungsaustausch in transparenten, offenen Strukturen zu stärken. So entstehen und festigen sich wichtige Beziehungen zwischen den Akteuren, die teilweise in gemeinsamen Forschungsvorhaben münden. Andererseits gelangen wichtige Ergebnisse aus der Forschung schneller in die Praxis. Die Forschungsnetzwerke bieten Raum für einen größtenteils selbstorganisierten Prozess der Mitglieder. Er wird durch gemeinsame Veranstaltungen, Webinare und Meinungsabfragen ergänzt (forschungnetzwerke-energie.de).

Kennzeichnend für die Energiewende ist die zunehmende Zahl und Vielfalt der Akteure, die die Energieversorgung der Zukunft beeinflussen. Ihr Gelingen wird davon abhängen, ob im Wettbewerb der verschiedenen Anspruchsgruppen ein Interessenausgleich und Grundkonsens gefunden werden kann. Dies ist auch eine Aufgabe der Energiefor-

schungspolitik. Die *Forschungsnetzwerke Energie* werden ihr durch eine enge und niederschwellige Ankopplung der Forscher-Community an politische Prozesse gerecht. Ministerielle Beiräte stehen jedem Forschungsnetzwerk zur Seite und unterstützen Austausch und Ergebnistransfer in die politische Facharbeit. Darüber hinaus können die Mitglieder der Forschungsnetzwerke auch an der Gestaltung der Energieforschungspolitik partizipieren und Impulse geben: Dazu zählt beispielsweise die Identifikation neuer Trends und Forschungsbedarfe sowie der Input der Fachleute im breit angelegten Konsultationsprozess zum vorliegenden Energieforschungsprogramm.

Vitale Forschungsnetzwerke werden weiterhin die unterschiedlichen Interessen aller Akteure zusammenführen und Kooperation sowie den gesellschaftlichen Dialog fördern. Besondere Aufgabe in den kommenden Jahren wird es sein, die bestehenden Forschungsnetzwerke strategisch weiterzuentwickeln und für ausgewählte Schwerpunktthemen gezielt auszubauen. Zusätzlich wird die Zusammenarbeit zu Querschnittsthemen wie Digitalisierung, Energiespeicherung und Sektorkopplung gefördert. Wichtige Akteure, die eine Multiplikatorfunktion in der Energiewende einnehmen können, sollen stärker in die Forschungsnetzwerke integriert werden. Die Einbeziehung von Startups ist hierfür ein Beispiel. Strategische Begleitforschungsvorhaben in den Forschungsnetzwerken werden die Forschungserkenntnisse bündeln und den Praxistransfer weiter verbessern.

3.4 Forschungskommunikation

Neben der Forschungsförderung gehört die Forschungskommunikation zu den zentralen Aufgaben der Energieforschungspolitik der Bundesregierung: Insbesondere wenn es darum geht, über Zukunftstrends und Forschungsinhalte zu berichten und den Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis zu befördern. Daneben soll die Forschungskommunikation Transparenz bei der Verwendung von Fördermitteln herstellen. Geeignete Formate und Instrumente des Austauschs und der Informationsverbreitung werden entwickelt und öffentlich zugänglich gemacht.

EnArgus ist das zentrale Informationssystem der Energieforschungsförderung (enargus.de). Das webbasierte Portal weist über 24.000 Forschungsprojekte im Energiebereich nach

und informiert darüber hinaus über verschiedene Energiethemata, Technologien und Fachbegriffe. Diese Datenbank leistet so einen entscheidenden Beitrag zur Transparenz in der Energieforschungsförderung, belegt die effiziente Mittelverwendung in den verschiedenen Vorhaben und ermöglicht Analysen für die zukünftige Ausrichtung der Förderpolitik. Auf dieser Grundlage wird der jährliche *Bundesbericht Energieforschung* erstellt, mit dem die Bundesregierung die Öffentlichkeit und das Parlament über die Förderaktivitäten des Bundes in der Energieforschung informiert. Beide Instrumente werden in den kommenden Jahren weiterentwickelt. So soll beispielsweise die *EnArgus*-Datenbank durch Einbindung weiterer Aktivitäten der Innovationsförderung des Bundes und der Länder erweitert werden.

Gerade weil es einen breiten gesellschaftlichen Konsens darüber gibt, dass die Förderung der Energieforschung ein lohnendes Ziel darstellt, ist es wichtig, die Öffentlichkeit umfassend über drängende Forschungsfragen, über Fortschritte wie Fehlschläge in Forschungsprojekten zu informieren. Dafür hat die Bundesregierung ein zentrales Webportal (energieforschung.de) mit einem vielfältigen Informationsangebot für die verschiedenen Zielgruppen geschaffen. Dort finden sich neben fundierten Informationen rund um die Energieforschung auch Forschungsportale zu verschiedenen Themenschwerpunkten sowie die Präsentation besonderer Forschungsinitiativen. Ob es um die Energiewende im Verkehr, im Bau- und Industriesektor oder um die erneuerbaren Energien geht – mit fachlich fundierten, verlässlichen Informationen zur Energieforschung soll der aktive Wissenstransfer dazu beitragen, die wirtschaftliche Umsetzung von Forschungsergebnissen bereits zu einem frühen Zeitpunkt vorzubereiten.

Weitere Aktivitäten der Energie- und Nachhaltigkeitsforschung werden auf der Webseite fona.de multimedial

vorgelegt. Inhalte zu verschiedenen Maßnahmen sowie Ergebnisse der drei FONA-Leitinitiativen *Energiewende*, *Green Economy* und *Zukunftsstadt* werden dem Fachpublikum, Wissenschaftsjournalisten und der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

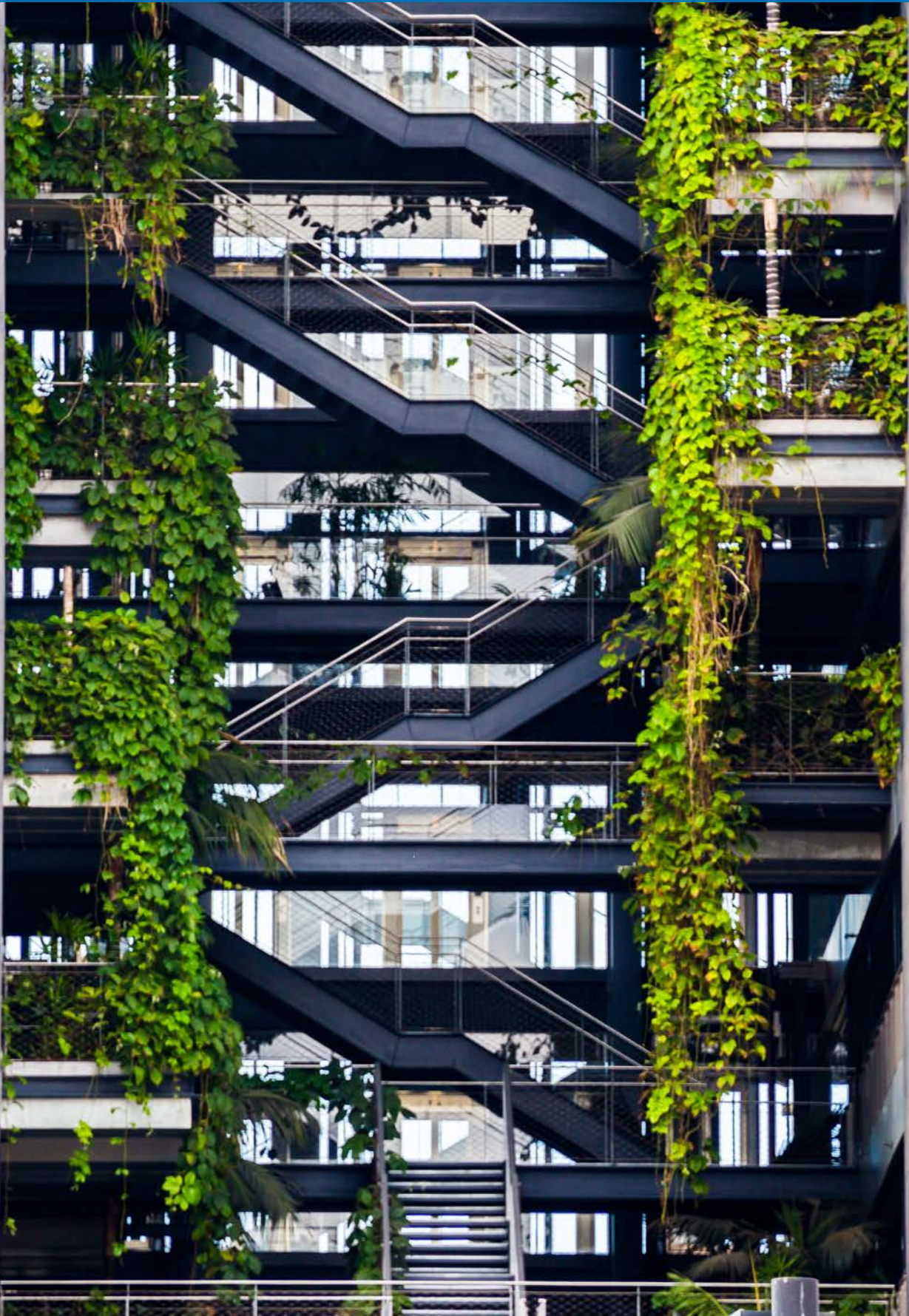
Informationen zur Energieforschung werden auch in sozialen Medien verbreitet. Neben der Möglichkeit, insbesondere die junge Generation über dieses Zukunftsthema zu informieren, bieten diese Informationskanäle die Möglichkeit zum direkten Austausch. Ein Ausbau wird daher angestrebt.

Im Rahmen ihrer Open-Access-Strategie unterstützt die Bundesregierung die freie Verfügbarkeit und Nutzung wissenschaftlicher Ergebnisse. Denn die Ergebnisse öffentlich finanzierter Forschungsvorhaben sollen der Allgemeinheit zugutekommen. Mit dem 7. Energieforschungsprogramm setzt sich die Bundesregierung deshalb dafür ein, den Open-Access-Gedanken noch stärker als bisher in der Energieforschung zu verankern.

Abb. 7: Austausch und Vernetzung



4. Projektförderung



4.1 Energiewende in den Verbrauchssektoren

4.1.1 Gebäude und Quartiere

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Rund 35 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland entstehen in Gebäuden, davon wiederum über 90 Prozent für die Bereitstellung von Wärme. Die Investitionszyklen für Gebäude und ihre technischen Systeme sind in der Regel sehr lang und erreichen mitunter deutlich über 30 Jahre. Aktuelle Investitionsentscheidungen wirken sich deshalb direkt auf den Gebäudebestand im Jahr 2050 aus. Die Bundesregierung strebt für das Jahr 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand an (*Energieeffizienzstrategie Gebäude* vom November 2015). Prinzipiell müssen Neubauten und Sanierungen daher bereits ab dem heutigen Zeitpunkt kompatibel mit den energiepolitischen Zielen für das Jahr 2050 sein. Die Grundlage dafür sind wirtschaftliche und zuverlässige technische Lösungen, die auch der Vielfalt des gebauten Bestands Rechnung tragen. Um Innovationen schnell in den Markt zu bringen, ist ein beschleunigter Ergebnistransfer von der Forschung in die Praxis essenziell. Besonders wichtig ist daher die Durchführung von Demonstrationsvorhaben, um neben der Technik auch die Abstimmung von Abläufen auf der Baustelle über Gewerke- und Firmengrenzen hinweg auf Praxistauglichkeit zu testen. Mit dem intelligenten Einsatz im Markt verfügbarer, aber noch nicht in der Breite eingeführter Komponenten können schon heute nahezu klimaneutrale Gebäude gebaut werden. Dennoch sind weitere Anstrengungen in Forschung und Entwicklung notwendig, auch um die Wirtschaftlichkeit innovativer Lösungen zu verbessern. Denn zum einen lassen sich ohne Innovationen klimaneutrale Gebäude und Quartiere im Bestand nur schwer erreichen, zum anderen kann die energetische Qualität von Gebäuden auch über die Klimaneutralität hinaus verbessert werden (z. B. Plus-Energie-Häuser).

Die Energieforschung in Gebäuden und Quartieren muss die Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer berücksichtigen. Denn auch für Energieeffizienz und Klimaschutz ist nichts gewonnen, wenn Gebäude den ihnen zugeordneten Zweck nicht zufriedenstellend erfüllen oder Effizienztechnologien zwar verfügbar sind, aber nicht wirtschaftlich angewandt werden können. Dadurch rücken Themen

wie die Warmmietenneutralität, erschwingliche Baupreise, Behaglichkeit oder auch Nutzerdatenschutz in den Fokus. Fragen der Akzeptanz müssen in allen Forschungsaktivitäten mitgedacht werden. Bei der Entwicklung von Technologien und Konzepten muss berücksichtigt werden, dass ihre Umsetzung nicht nur aus technischer Perspektive, sondern auch aus Nutzersicht wünschenswert ist. Akzeptanzforschung kann Methoden entwickeln, zum Beispiel partizipative Ansätze, die komplexe Transformationsprozesse für die Betroffenen verständlich machen und einen Austausch bei eventuellen Zielkonflikten ermöglichen.

Neben der Entwicklung einzelner Gebäudetechnologien und gebäudeintegrierter EE-Erzeugungsanlagen gewinnt das systemische Zusammenwirken von Gebäuden untereinander und mit der Energieinfrastruktur an Bedeutung. Dies betrifft sowohl hoch verdichtete urbane Quartiere, in denen beispielsweise durch gemeinsame oder vernetzte Versorgungssysteme Effizienzgewinne entstehen können. Es betrifft aber auch ländliche Regionen, in denen die dezentrale Nutzung lokal und temporär verfügbarer erneuerbarer Energien die Verteilnetze entlasten kann. Gebäude und Quartiere müssen zukünftig im Rahmen der Sektorkopplung stärker mit dem Strom- und auch mit dem Verkehrssystem interagieren. Denn die Verbindung der Gebäudeinfrastruktur mit der Energieversorgung im Verkehrsbe- reich z. B. durch die Nutzung von Fahrzeugen als Speicher für lokal erzeugte erneuerbare Energien kann zur Verbesserung der Klimabilanz und der Energieeffizienz beitragen. Durch die Zunahme dezentraler Versorgungsstrukturen und die Verknüpfung der Sektoren Strom, Verkehr, Wärme unter Einbeziehung der Mobilität auf Quartiersebene wird eine enorme Flexibilisierung im Bereich der netzgebundenen Energieversorgung notwendig. Die damit verbundene Komplexität durch fluktuierende Einspeisungen und Entnahmen bedarf einer weitreichenden digitalen Vernetzung und Nachfrageflexibilität, um die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleisten zu können. Damit ein systemischer Ansatz gelingen kann, sollten sowohl Komponenten als auch Systeme herstellerunabhängig miteinander kommunizieren können und möglichst standardisiert sein.

Systemische Lösungen auf der Gebäude- oder Quartiers- ebene müssen auch das Thema „graue Energie“, also in Baustoffen gebundene Energie- und Treibhausgasäquiva-

lente, berücksichtigen. Denn bei generell abnehmenden Energieverbräuchen fallen Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen bei der Produktion, beim Rückbau und Recycling von Baustoffen und Gebäudetechnologien stärker ins Gewicht. Lebenszyklusanalysen sind hilfreich und notwendig, um die verschiedenen Beiträge der bau- und anlagentechnischen Lebensphasen für unterschiedliche technologische Lösungen transparent zu machen. Dabei sind auch Aspekte der Ressourcen- und Flächeneffizienz zu beachten.

Immer mehr Menschen in Deutschland wohnen und arbeiten in Städten. Urbane Quartiere sind daher ein wichtiger Fokus der Energieforschung. Die Anforderungen der Bundesregierung an die energieeffizienten Quartiere der Zukunft bedingen einen umfassenden Transformationsprozess: Neben den energie-, nachhaltigkeits- und ressourcenbezogenen Herausforderungen sind auch soziale Faktoren wie das Wohnumfeld, neue Formen des Wohnens und Arbeitens, Demographie, Stadt-Umland-Beziehungen und nachhaltige Mobilität in die Planungs- und Bauprozesse zu integrieren – bis hin zu baukulturellen Ansprüchen und Denkmalpflege.

Dieser ganzheitliche Ansatz macht das energetische Quartierskonzept zum Teil einer gesamtstädtischen Entwicklungsstrategie. Die Entwicklung und Erprobung von systemischen und innovativen Gesamtlösungen für eine klimaneutrale Entwicklung auf der Quartiersebene soll daher gefördert werden. Eine wichtige Rolle kommt dem Umbau der Energieversorgungsinfrastruktur zu. Er muss mit der schrittweisen Ertüchtigung der zu versorgenden Gebäude in Einklang gebracht werden. Dabei sind die unterschiedlichen Akteure in den verschiedenen Phasen einer Entwicklung, wie Unternehmen, Investoren, Stadtwerke und Kommunalverwaltungen, zu beteiligen. Zur Umsetzung dieses Ansatzes sind Reallabore, die auch längere Laufzeiten ermöglichen, ein geeignetes Format.

Die Bundesregierung fördert die Forschung und Entwicklung von Technologien mit spezifischen Energiebezügen im Baubereich auch außerhalb des Energieforschungsprogramms, z. B. im Rahmen der Initiative *Effizienzhaus Plus* der Bauforschung. Als ein Element der Baupolitik werden Maßnahmen für energieeffizientes, nachhaltiges und zukunftsgerechtes Bauen sowie der zeitnahe Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis unterstützt. Im Rahmen der Forschung für eine nachhaltige Entwicklung (FONA) trägt die Initiative *Zukunftsstadt* durch bedarfsgerechte,

praxisorientierte, inter- und transdisziplinäre Forschung zur Bewältigung der Herausforderung des vermehrt urbanen Lebens bei. Zudem werden Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien große Potenziale im Verkehrsbereich zugeschrieben, weshalb anwendungsspezifische Forschungsaktivitäten dazu durch das Verkehrsressort gefördert werden.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Der Bereich Gebäude und Quartiere umfasst ein breites Spektrum an FuE-Themen. Innovationen zu Baustoffen und Materialien sowie die Weiterentwicklung von bautechnischen Komponenten und Gebäudetechnik bilden die Basis für ortsangepasste, integrierte Konzepte. Sie sollen die Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung thermischer und elektrischer Energie in Einklang bringen.

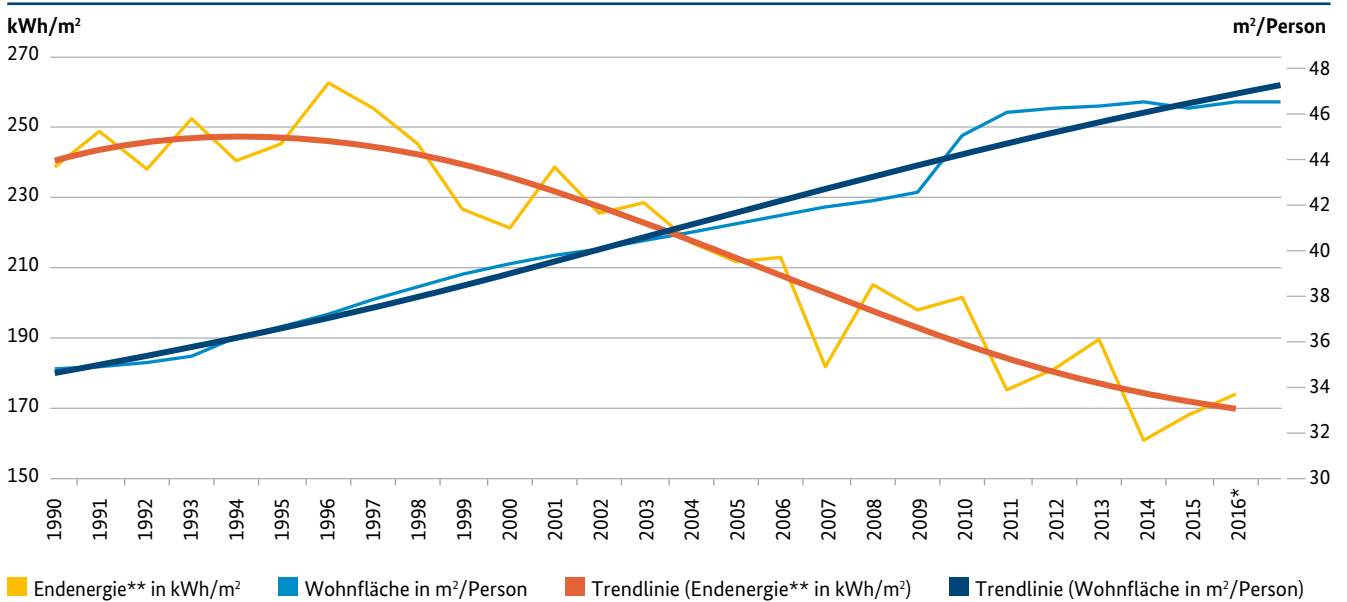
Gebäudetechnik und innovative Materialien

Die Weiterentwicklung und Nutzung innovativer thermischer Speichertechnologien, die Erschließung von erneuerbaren Energiequellen und Umgebungswärme, eine effizientere und integrierte Gebäudetechnik sowie ein nachhaltiger oder sogar adaptiver Wärmeschutz sind wichtige Forschungsthemen. In diesen Bereichen sollen durch technologische Innovationen, vor allem aber durch Materialforschung notwendige Fortschritte erzielt werden. Auch Innovationen im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung sowie passive Gebäudekomponenten tragen zur Steigerung der Energieeffizienz bei, wobei Aspekte der Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz zu beachten sind. Dies trifft auch auf die Verbesserung von Produktionstechnologien sowie die energetische und ökonomische Technologiebewertung zu. Ebenso müssen ganzheitliche Rückbau-, Verwertungs- und Entsorgungsstrategien erforscht werden. Umfassende Lebenszyklusanalysen auf der Gebäudeebene sollen die Erfolgsaussichten der entwickelten Strategien über alle Nutzungsphasen bewerten.

Integration von erneuerbaren Energien

Die gesamte Hülle eines Gebäudes soll künftig adaptiver und aktiver werden, auf Umwelteinflüsse reagieren, Gebäudetechnik integrieren, Energie umwandeln und speichern können. Gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) und Solar-

Abb. 8.1: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen: Entwicklung des Endenergieverbrauchs pro Quadratmeter und Jahr, sowie der Wohnfläche pro Person

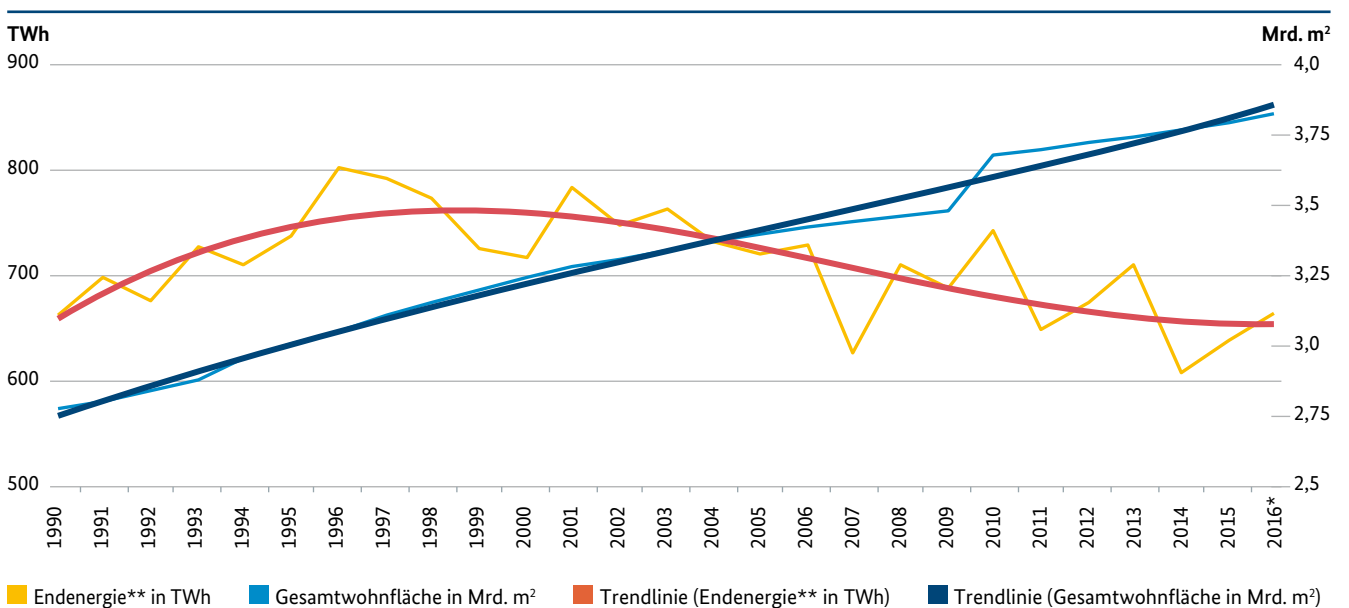


* Energiedaten für 2016 sind vorläufig.

** Daten zum Endenergieverbrauch sind nicht temperaturbereinigt.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Wohnungsdaten) und AG Energiebilanzen (Energiedaten)

Abb. 8.2: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen: Entwicklung des Endenergieverbrauchs insgesamt, sowie der Gesamtwohnfläche



* Energiedaten für 2016 sind vorläufig.

** Daten zum Endenergieverbrauch sind nicht temperaturbereinigt.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Wohnungsdaten) und AG Energiebilanzen (Energiedaten)

thermie sowie gekoppelte photovoltaisch-thermische Lösungen werden dabei eine wichtige Rolle spielen. Nebenbei entstehen auch neue architektonische Freiheitsgrade, die konsequent zum Nutzen der Bewohner eingesetzt werden sollten. In Quartieren lassen sich bei der Integration erneuerbarer Energien weitere Synergien nutzen. Zudem kann die verstärkte Integration erneuerbarer Energien in Gebäude und Quartiere zur Steigerung der Versorgungssicherheit beitragen.

Wärme und Kälteversorgung

Mit Blick auf die Wärme-, Kälte- und Stromversorgung von Gebäuden und Quartieren können neuartige Konzepte technische Lösungen schaffen, die nutzerseitig flexibel auf das zeitlich fluktuierende Angebot erneuerbarer Energien reagieren. Durch die Sektorkopplung in der Wärme- oder Kälteversorgung lässt sich eine erhöhte Flexibilität erreichen. Durch das Zusammenfassen größerer Gebäudekomplexe oder Quartiere ergeben sich Synergien hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit, aber auch eine gesteigerte Komplexität. Vielversprechend sind innovative Niedrig-Exergie (LowEx)-Gesamtkonzepte für eine erneuerbare, netzgebundene, dezentrale Wärme- und Kälteversorgung. Sie ermöglichen die einfache Nutzung erneuerbarer Energie und Abwärme und können Flexibilität für das Stromsystem bereitstellen. Die Entwicklung effizienter und wirtschaftlicher Wärme- und Kältespeicher und deren Optimierung für den Einsatz in der kommunalen Energieversorgung ist hierfür eine wichtige Grundlage. Weitere wichtige Forschungsthemen sind die Verknüpfung von Wärmeversorgungssystemen mit Geothermie, Solarthermie, Bioenergie, Umwelt- und Abwärme sowie die intelligente Kopplung von Wärmequellen und -senken, beispielsweise durch eine digitale Vernetzung.

Die stärkere Vernetzung mit dem Stromsektor (siehe Kapitel 4.3.3) kann im Bereich Wärme/Kälte zu Synergien führen. Strom als flexibelster Energieträger sollte bei einer Nutzung im Wärmesektor möglichst effizient verwendet und im Hinblick auf die Klimaschutzziele klimaneutral erzeugt werden. Durch die Verfügbarkeit der grundlegenden Technologien leistet die Kopplung von Strom und Wärme bereits heute einen relevanten Beitrag zu einem stabilen Energiesystem. Innovative Konzepte für Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und intelligente Regelungstechnik müssen als Beitrag für effiziente Gesamtlösungen in Gebäude und Quartier weiterentwickelt wer-

den. Bei Wärmepumpen besteht Forschungsbedarf mit Blick auf neue Temperaturniveaus, weitere Effizienzsteigerungen und Kostensenkung, z. B. durch verbesserte Produktionsprozesse.

Thermische Speicher

Thermische Speicher sind ein zentrales Element zur Systemintegration und Flexibilisierung des Energiesystems und damit zugleich ein breit aufgestelltes Querschnittsthema der Energieforschung. Durch die Integration von Speichern in Gebäuden, Quartieren und in der Industrie (siehe Kapitel 4.1.2) können die schwankenden Erträge aus lokal verfügbaren Quellen genutzt werden, wodurch Primärenergie eingespart und die Versorgungssicherheit erhöht wird. Wesentliche Ziele der Forschung für thermische Energiespeicher sind daher Kostensenkung, Effizienzsteigerung der Energiewandlung, Erhöhung der Zuverlässigkeit und Sicherheit sowie die beschleunigte Integration von Speicherlösungen, d. h. auch von Großwärmespeichern, in das Energiesystem. Dazu müssen innovative Speicher-materialien erforscht, neue Speicherkonzepte identifiziert und optimierte Komponenten sowie kostengünstige Produktionsprozesse entwickelt werden. Auch die Kombination oder Wechselwirkung mit Stromspeichern (siehe Kapitel 4.3.2) ist zu berücksichtigen und netz- bzw. systemdienlich zu gestalten.

Stationäre Brennstoffzellen und KWK

Stationäre Brennstoffzellen werden insbesondere im Kontext von Gebäuden und Quartieren zur Anwendung kommen. Durch eine hocheffiziente und schadstoffarme Wandlung von Brennstoffen mit hoher gravimetrischer Energiedichte wie Wasserstoff oder übergangsweise Erdgas in elektrische Energie und Wärme hat diese Technologie das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Energiewende zu leisten. Dabei sind die Nutzung von Stromüberschüssen zur Wasserstoffproduktion in reversiblen Brennstoffzellen oder Elektrolyseuren (siehe Kapitel 4.3.3) oder Sonderanwendungen wie die netzferne Stromversorgung zu berücksichtigen.

Die Brennstoffzellentechnologie hat nach jahrzehntelanger Forschung inzwischen eine technologische Reife erlangt. Die im Vergleich zu Leistung und Lebensdauer noch zu hohen Kosten erweisen sich jedoch als Hemmnis für eine

breite Markteinführung. Neben Ansätzen für effiziente und kostengünstige Technologien der nächsten Generation können neue Fertigungsprozesse für hohe Stückzahlen dazu beitragen, die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich fokussiert auf zwei Brennstoffzellentypen, die Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEM) und die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC). Die Forschungsschwerpunkte umfassen dabei gleichermaßen eine spätere Nutzung in stationären oder mobilen Anwendungen. Forschungsziele sind die Erhöhung der Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer unter typischen (flexiblen) Einsatzbedingungen, die Kostensenkung von Kern- und Systemkomponenten, die Reduktion des Systemaufwands sowie die Optimierung von Betriebsstrategien. Zur weiteren Kostensenkung müssen zudem hochdurchsatzfähige Fertigungstechnologien entwickelt werden (Industrialisierung der Produktion). Grundlagen für die Verbesserungen der Gesamtenergiebilanz schaffen Betrachtungen zur Wiederverwertung (Recycling) oder Substitution teurer oder begrenzt verfügbarer Grundstoffe und Materialien sowie Lebenszyklus-Analysen. Begleitend soll die Materialforschung und Konzeptentwicklung für künftige Technologiegenerationen gefördert werden.

Die Marktvorbereitung künftiger Generationen der Brennstoffzelle wird unter anderem durch Demonstrationsvorhaben, Feldtests und gegebenenfalls im Rahmen von Reallaboren unterstützt. Hierdurch kann die Marktreife bestehender Systeme tiefgreifend validiert werden, indem auch weitere Bestimmungsfaktoren wie Betriebsführungsstrategien und Qualitätssicherung einbezogen werden. Ein weiterer Schritt zur Verbreitung der Brennstoffzelle ist die wissenschaftlich getriebene Vorbereitung international akzeptierter und validierter Normen und Standards im Bereich der Brennstoffzellenkomponenten.

Anlagen, die nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) arbeiten, sind integraler Bestandteil einer effizienten und klimafreundlichen Energieversorgung. Dezentral eingesetzt, können sie im Kontext von Gebäuden und Quartieren besonders hohe Gesamtenergienutzungsgrade erreichen. Da für energieeffiziente Gebäude der Wärmebedarf relativ zum Strombedarf sinkt, gewinnen KWK-Anlagen mit hoher Stromausbeute an Bedeutung. Dies erklärt die hohen Erwartungen an den Einsatz der Brennstoffzellen-Technologie für KWK. Daneben, aber insbesondere in Kombination mit der Brennstoffzellen-Technologie, sind Mikro-Gasturbinen ein wichtiges Forschungsthema. Brenn-

stoff- und Lastflexibilität sowie die intelligente Integration in die Energieversorgung von Gebäuden und Quartieren stehen hier im Vordergrund (siehe auch Kapitel 4.2.6).

Digitales Planen, Bauen und Wohnen

Die umfassende Nutzung digitaler Optionen bei der Planung von Sanierungs- und Neubaumaßnahmen von Wohn- und Nichtwohngebäuden sowie der Bewirtschaftung von Gebäuden ist eine Kernaufgabe. Hierunter fällt auch die Entwicklung von Planungshilfsmitteln. Die Digitalisierung des Planens entlang der Wertschöpfungskette der Bauwirtschaft erfordert auch eine vermehrte Anstrengung auf Seiten der praxisnahen Forschung. Die Weiterentwicklung des anbindungsfähigen Building Information Modelling (BIM) sowie die Adressierung energetischer Aspekte im Rahmen der Digitalisierungsprozesse sind Herausforderungen, die weitere Aktivitäten der Forschung erfordern. So muss sichergestellt werden, dass einerseits innovative digitale Tools aus der Forschung in der Anwendung auch angenommen werden. Andererseits müssen Berechnungen zur Energieeffizienz den Weg in die BIM-Programme und -Prozesse finden. Um einen langfristigen wirtschaftlichen Erfolg zu ermöglichen, müssen offene und für alle beteiligten Akteure frei zugängliche Schnittstellen definiert werden. Auch die energetische Betriebsoptimierung kann durch digitale und einfach zu bedienende Diagnosetools vorangebracht werden.

Digitale Technologien sind schon lange im Wohnumfeld angekommen. Wie diese zur Verbesserung der Energieeffizienz beitragen können (Smart Building), ist aber oft noch eine offene Frage. Die Möglichkeiten der IKT nehmen dabei auch im Gebäudebereich ständig zu, weshalb Fragen der IT-Sicherheit und des Datenschutzes nicht aus dem Blick geraten dürfen.

Für die Quartiersentwicklung werden digitale Technologien gleichfalls immer wichtiger. Daher sollen Ansätze für smarte Quartiere unter Beachtung des Datenschutzes, der Sicherheit von IKT und der Verwendung von Big-Data-Methoden erforscht werden. Dadurch ermöglichte Verfahren zur ganzheitlichen Bilanzierung und Optimierung von Quartieren sowie zur Simulation und Modellierung von Sanierungspfaden sollen gleichfalls entwickelt und erprobt werden.

Obschon das digitale Bauen kein primäres Thema der Energieeffizienz ist, berühren die sich hier eröffnenden Möglichkeiten und Potenziale auch die Energieforschung. Beispielhaft ist hierfür die Steigerung der Kosteneffizienz energetisch hochambitionierter Neubauten und Sanierungen durch die Nutzung von 3-D-Druck, automatisierter Vermessung (inkl. Drohnentechnologie) und serieller Bauverfahren in Verbindung mit digitaler Planung und industrieller Fertigung.

Forschungstransfer für die Energiewende im Quartier

Das Quartier hat als Bühne für die Umsetzung großer Demonstrationsprojekte (siehe Kapitel 3.1) eine besondere Eignung. Denn dort findet sich im Idealfall auf relativ kleiner Fläche das für die Umsetzung der Energiewende repräsentative Gefüge und Instrumentarium in allen Facetten wieder. Die Einflüsse wirtschaftlichen Strukturwandels wirken sich hier ebenso aus wie regionaltypische Besonderheiten der Baukultur, städtebaulichen Strukturen und Bevölkerung. Um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen und die Komplexität der Vernetzung aus Energie- und Wärmeversorgung, Systemintegration und der Bereitstellung von Mobilität bis hin zu gesellschaftlichen Prozessen und Bedürfnissen überschaubar zu machen, sind Demonstrationsprojekte auf Quartiersebene die geeignete Größenordnung. Zudem schärfen sie den Blick für komplexe, langfristige Planungs- und Genehmigungsprozesse. Demonstrationsprojekte können praxistaugliche und akzeptierte Perspektiven und Umsetzungspfade hin zu klimaneutralen und energieeffizienten Quartieren aufzeigen, die erneuerbare Energien integrieren und eine hohe Lebensqualität bieten.

Solche Projekte erreichen die Menschen da, wo sie zuhause sind: Damit der Transfer gelingt, ist es wichtig, Datenschutz und Privatsphäre, Benutzerfreundlichkeit und Behaglichkeit zu berücksichtigen. Forschung zum wahrscheinlichen Nutzerverhalten ist ebenfalls von hoher Relevanz. Dies betrifft eine gelungene Ansprache von Akteuren, Methoden zur Bündelung von Kompetenzen sowie die bedarfsorientierte strategische Neuausrichtung von Institutionen und deren Organisation (Institutionendesign).

Für interdisziplinäre Kooperationen und wechselseitige Lernprozesse und um ein gemeinsames Forschungsverständnis zu generieren, ist die Einbindung aller Akteure, Sektoren und Gebäude auf Quartiersebene unabdingbar. Ziel von Demonstrationsprojekten wie Modellvorhaben,

Transformationsprojekten oder Reallaboren ist neben dem nachhaltigen Transfer das Aufzeigen systemischer Konzepte zur energetischen Optimierung auf Quartiersebene. Dabei werden integrale Lösungsansätze für unterschiedliche, aber übertragbare städtische oder ländliche Quartierstypen betrachtet – mit folgenden Schwerpunkten:

- Quartiere im Strukturwandel
- Quartiere und Sektorkopplung
- Quartiere im demographischen Wandel
- Synergien für Wohnquartiere und Produktionsareale
- Planung, Umsetzung und Monitoring innovativer Versorgungskonzepte
- Geschäftsmodelle für die Energiewende zur Minimierung von Markt- und Umsetzungshemmnissen

Strukturen der FuE-Förderung

Die Bundesregierung bündelt die Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration für energieeffiziente Gebäude und Quartiere in der Forschungsinitiative *ENERGIEWENDEBAUEN*. Neben laufenden Förderbekanntmachungen und Fachportalen umfasst diese auch das *Forschungsnetzwerk ENERGIEWENDEBAUEN*. Es dient dazu, nicht nur die Themen zu bündeln, sondern auch die vielfältigen Akteure rund um Energieeffizienz und erneuerbare Energien in Gebäuden und Quartieren zu vernetzen. In diesem offenen Expertenforum werden Forschungsaktivitäten synchronisiert und Ergebnisse aus der Forschung mit Akteuren aus der Praxis diskutiert. Zusätzlich zu den etablierten Formaten der Handbücher, Leitfäden, der elektronischen Planungshilfsmittel, Workshops sowie speziellen Fachveranstaltungen und Kongressen sollen die themenspezifischen Arbeitsgruppen des *Forschungsnetzwerks ENERGIEWENDEBAUEN* künftig noch stärker als Instrument zur zielgruppenorientierten Wissensvermittlung und Transferbeschleunigung eingesetzt werden. Für die Bearbeitung von Querschnittsthemen sind enge Kooperationen mit den anderen Netzwerken vorgesehen.

Einen zentralen Beitrag zur Forschungsinitiative leistet die wissenschaftliche *Begleitforschung ENERGIEWENDEBAUEN*, die Arbeitsprogramme und Ergebnisse der Forschungs- und Demonstrationsvorhaben sammelt und aus-

wertet, mit allen Beteiligten diskutiert und so aufbereitet, dass diese in der Planungs- und Entscheidungspraxis nachhaltig Eingang finden können. Ein Schlüssel zum Erfolg ist der nutzerorientierte Wissenstransfer über ein benutzerfreundlich ausgestaltetes Wissensmanagement und der Erfahrungsaustausch angesichts des sehr komplexen Fördergegenstands. Hinzu kommt die Einbindung der relevanten Akteure im Rahmen partizipativer Prozesse.

Neben Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekten werden im Bereich Gebäude und Quartiere auch marktnahe Modell- und Pilotprojekte gefördert (*EnEff.Gebäude.2050*). Diese demonstrieren breitenwirksame Lösungen (technologisch und nicht-technologisch) für klimaneutrale Gebäude und Quartiere mit Leuchtturmcharakter und bringen damit eine Markteinführung oder breite Umsetzung voran. Durch die starke Nutzereinbindung in diesem Forschungsbereich eignet dieser sich auch besonders für innovative und partizipative Formate wie Wettbewerbe, spezielle Experimentierräume und Realabore.

Auf nationaler Ebene fügen sich Forschung und Entwicklung zur Brennstoffzellentechnologie in das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP 2) (2016 – 2026) ein. Das NIP 2 dient der Marktvorbereitung. In diesem Rahmen sollen ressort- und programmübergreifende Forschungsinitiativen weiter ausgebaut werden, unterstützt durch eine engere Anknüpfung der Akteure an die *Forschungsnetzwerke Energie*.

Auch die Vernetzung auf internationaler Ebene soll auf Grundlage der bestehenden Kooperationsformate weiter ausgebaut werden. Durch ein seit 2013 bestehendes Memorandum of Understanding zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Forschung, Entwicklung und Demonstration von intelligenten, energieeffizienten Städten der Zukunft in Deutschland, Österreich und der Schweiz sind länderübergreifende (D-A-CH) Forschungsk Kooperationen möglich.

In drei Arbeitsgruppen des europäischen SET-Plans zu *Positive Energy Districts 2025*, *Smart Solutions for Energy Consumers* und *Energy Efficiency in Buildings* mit den Schwerpunkten *New Materials and Technologies for Buildings* und *Heating and Cooling for Buildings* findet eine regelmäßige Mitarbeit statt. Die FuE-Aspekte in den SET-Plan-Arbeitsgruppen zu einzelnen Gebäudetechnologien werden im Rahmen des Energieforschungsprogramms abgedeckt. Auch auf internationaler Ebene ist Deutschland in den

Gremien *IEA Energy in Buildings and Communities* und *IEA Solar Heating and Cooling* vertreten. Deutschland beteiligt sich zudem im Rahmen von Mission Innovation an der *Affordable Heating and Cooling of Buildings Innovation Challenge*.

4.1.2 Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Die Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (IGHD) gehören neben Verkehr und Haushalten seit Langem zu den größten Energieverbrauchern in Deutschland. Die Tendenz des Energieverbrauchs ist allerdings rückläufig. Rund 30 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfallen auf die Industrie, zwei Drittel davon fallen in Form von Prozesswärme an. Ursächlich sind neben der industriellen Fokussierung auf hochspezialisierte Materialien und Verfahren vor allem innovative Technologieentwicklungen im Bereich industrieller Energieeffizienz, die nur durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung zugänglich sind. Sie ist deshalb ein entscheidendes Instrument, damit Industrie und Gewerbe auch langfristig wettbewerbsfähig bleiben.

Bei der Identifikation von wirksamen Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs sind auch die Strukturen der Sektoren zu betrachten. Eine große Wirkung auf die Energiebilanz geht von wenigen Einzelanlagen in energieintensiven Branchen aus. Weite Teile der Unternehmenslandschaft in Deutschland sind jedoch von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) geprägt, die jeweils nur einen geringen Beitrag an der Energiebilanz aufweisen und auch nur über begrenzte Forschungskapazitäten verfügen. Die Aufgabe der Forschungsförderung ist es deshalb, durch gezielte Unterstützung besonders innovativer und risikofreudiger Unternehmen die benötigten Technologieentwicklungen beschleunigt auszulösen – begleitet durch hochkarätige Forschungseinrichtungen. Durch eine branchenübergreifende Vernetzung lässt sich sicherstellen, dass die gewonnenen Ergebnisse auch breitenwirksam bekannt und umgesetzt werden.

Nach Mineralöl, Kohle und Gas ist Strom im Sektor IGHD wichtigster Energieträger. Sein Anteil am industriellen Energiemix nimmt sukzessive zu. Verantwortlich hierfür ist die Substitution fossiler Energieträger zur Bereitstellung

von Wärme und mechanischer Energie. Aber auch durch die zunehmende Automatisierung und Digitalisierung industrieller Prozesse steigt die Stromnutzung. Dabei ist in den vergangenen Jahrzehnten der Anteil an industriellen Eigenanlagen zur Stromversorgung rückläufig, zugunsten einer externen Versorgung durch Kraftwerke der allgemeinen Versorgung sowie durch die Einspeisung erneuerbarer Energiequellen.

Mit diesen Entwicklungen reagiert die Industrie auf die Veränderungen des Angebots im Stromsektor. In Zusammenhang mit der langfristigen Veränderung des Strommixes wird so die industrielle CO₂-Bilanz durch reduzierten Verbrauch fossiler Energieträger weiter verbessert. Gleichzeitig entstehen neue Herausforderungen, z. B. hinsichtlich der flexiblen Nutzung fluktuierend bereitgestellten Stroms aus erneuerbaren Quellen. Der Schlüssel zum Erreichen der Klimaziele in Industrie und Gewerbe liegt jedoch darin, die Energieeffizienz in der gesamten Themenbreite zu steigern. Hierzu ist die Energiebilanz entlang des gesamten Lebenszyklus der Produkte zu betrachten – von der Rohstoffgewinnung über die Verarbeitung, Fertigung und den Energieverbrauch während der Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung oder Aufarbeitung am Ende der Lebensdauer. Bei der Bereitstellung von Prozesswärme wird zudem eine wesentlich stärkere Nutzung von erneuerbaren Energiequellen erwartet.

In den Sektoren Industrie und Gewerbe sind nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen viele Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bereits umgesetzt. Bisher können Kostensteigerungen, die durch höhere Umweltauflagen, gestiegene Energiepreise oder auch spezifische Kundennachfrage verursacht werden, durch Energieeffizienzmaßnahmen und die Integration erneuerbarer Energien teilweise abgefedert werden. Weitere Effizienzpotenziale können erschlossen werden, wenn sich die Handlungsperspektive von unabhängigen Einzelprozessen auf technologieübergreifende Effizienzstrategien erweitert und der Blick auch auf die Flexibilisierung des Energiesystems gerichtet wird.

Die über Jahrzehnte rasant steigenden Rechen- und Datenkapazitäten und die daraus resultierende Miniaturisierung, Modularisierung sowie der Preisverfall haben die Informationstechnologie zu einem wirkungsvollen Entwicklungsinstrument gemacht. Dies hat, zunächst in separaten Anwendungsfällen (als Offline-Instrument), die Forschung auf bewährten Wegen beschleunigt. Dazu wurden, etwa in Verbindung mit Simulation oder additiver Fertigung, gänzlich

neue Möglichkeiten eröffnet. Durch die in den letzten Jahren einsetzende systematische datenmäßige Vernetzung elektronischer Komponenten hat die Digitalisierung (auch online) Einzug in die Welt der Prozesssteuerung und Prozessoptimierung gehalten und der Energieeinsparung und Flexibilisierung damit neue Impulse gegeben. Durch die zunehmenden Verknüpfungen und gegenseitigen Abhängigkeiten steht die Digitalisierung in Industrie und Gewerbe aber auch in der Verantwortung, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Prozesse zu gewährleisten und negative Auswirkungen bis hin zur Instabilität des Energiesystems auszuschließen.

Es bedarf umfangreicher Forschung und Technologieentwicklung, um im Rahmen der Energiewende die gewünschte Transformation hin zu CO₂-armen Industrieprozessen zu bewältigen. Die Forschungsförderung trägt dazu bei, die damit verbundenen wirtschaftlichen Risiken zu begrenzen. Auf den internationalen Märkten kann durch den Know-how-Zuwachs die Position der heimischen Industrie nachhaltig gestärkt werden.

Dazu werden folgende programmatische Ziele verfolgt:

- branchenübergreifende Reduktion des Energieeinsatzes durch innovative und effiziente Prozesse und Prozesstechnologien
- branchenspezifische energetische Optimierung bestehender Industrieprozesse
- effizienter Einsatz sekundärer Energieformen, Ersatz fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien
- konsequentes Ausschöpfen des Energieeffizienzpotenzials industrieller Querschnittstechnologien, Flexibilisierung der Industrieprozesse hinsichtlich der Einbindung ins Energiesystem

Strategisch wichtige FuE-Themen

In den Sektoren Industrie und Gewerbe können die energiebedingten und prozessbedingten Treibhausgasemissionen auf unterschiedlichsten Wegen (z. B. durch Effizienzsteigerung) gesenkt werden. Bereits bestehende vielversprechende Forschungsansätze können Innovationen in energieintensiven Branchen auslösen, aber auch in der Summe kleinerer Effizienzpotenziale große Effekte mit Breitenwirkung erzielen. Die energieeffiziente Gestaltung bereits

etablierter Prozesse ist dabei ebenso Thema der Energieforschung wie die Entwicklung neuer Materialien und dazugehöriger Fertigungsverfahren. Sie sollten allerdings dem vorrangigen Ziel der weitgehenden Treibhausgasneutralität im Jahr 2050 dienen.

Energieintensive Grundstoffindustrien

Die Industriezweige mit hohem Energieumsatz, wie etwa die Branchen Stahl und Eisen, Baustoffe, Glas, Chemie und Papierherstellung, haben naturgemäß ein großes wirtschaftliches Eigeninteresse an der energieeffizienten Gestaltung ihrer Prozesse. Weiterer Forschungsbedarf wird bei langfristigen Demonstrationsprojekten mit Signalwirkung für spätere Pilotanlagen gesehen. Deren Umsetzung ist aufgrund der notwendigen Anlagengrößen mit erheblichen FuE-Risiken behaftet.

Die chemische Industrie ist dazu übergegangen, die Energieeffizienz ausgehend von den Großprozessen für Prozesse mit immer kleinerem Stoffdurchsatz zu erschließen. Die Modularisierung der Anlagen und Verfahren, die Substitution absatzweiser durch kontinuierliche Produktionsweisen und die Verkürzung der Prozessketten sind wichtige Zukunftsthemen. Da die Grundstoffchemie bisher weitgehend auf den fossilen Rohstoffen Rohöl und Erdgas basiert, muss in Zukunft eine Umstellung der technischen Rohstoffbasis auf regenerative Quellen erfolgen. Der hierzu nötige Power-to-Chemicals-Prozess kann neben der regenerativen Synthese wichtiger Grundstoffe perspektivisch auch eine weitere industrielle Dimension der Energiespeicherung eröffnen (siehe Kapitel 4.3.3).

Die Zunahme von Strom aus erneuerbaren Quellen lässt die Elektrifizierung der Industrie, insbesondere bei der Prozesswärmebereitstellung, zu einer effektiven Maßnahme der CO₂-Vermeidung werden. Die damit verbundenen Umstellungen erfordern weitere Forschungsaktivitäten, um die Prozessgüte und -sicherheit aufrechtzuerhalten. Die bestehenden technischen Flexibilisierungsmöglichkeiten in der Industrie sind dabei weiterzuentwickeln, um auf häufige oder schnelle Laständerungen im Stromnetz reagieren zu können und auf diese Weise die Industrieanlagen netzdienlich in das Energiesystem zu integrieren. Hier ist auch die Wechselwirkung zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und ihren Auswirkungen auf die Anlagen und kritischen Komponenten zu untersuchen.

Branchenspezifische Maßnahmen in der Breite der Sektoren Industrie und Gewerbe

Neben den industriellen Großverbrauchern steht die Breite (insb. im Mittelstand) des Sektors als zweite Säule der industriellen Energieeffizienz. Die Vielzahl der Akteure, z. B. im Bereich der KMU, geht mit einer ebenso großen Zahl verschiedener Technologien und Anwendungsfälle einher. Sie werden von einer technologieoffenen Forschungsförderung unterstützt, die Forschungsbedarfe und Zusammenhänge aktiv aufgreift und zu strategischen Schlüsselthemen bündelt. Während in der Vergangenheit das Einzelverfahren Gegenstand der Effizienzforschung war, tendiert die Sichtweise zunehmend hin zu Prozesszusammenhängen, um dadurch weitere Effizienzpotenziale zu erschließen. Exemplarisch sind folgende Themen zu nennen:

Die bestehenden komplexen Forschungsfragen im Themenfeld der Fertigungstechnik sollen durch ein interdisziplinäres Zusammenspiel der beteiligten Fachdisziplinen, wie etwa Maschinenbau, Leichtbau und additive Fertigung, Elektrotechnik, Informatik und Betriebswirtschaft aufgelöst werden.

Die Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) hat in der Energietechnik prototypisch nachgewiesen, dass sowohl in industriellen Hochstromanwendungen wie auch bei Komponenten im Stromnetz energetische Vorteile gegenüber konventionellen Verfahren zu erreichen sind, ohne bei der Zuverlässigkeit Einbußen hinnehmen zu müssen. Für eine künftige Markterschließung wird neben optimierten und reproduzierbaren Fertigungsprozessen der HTSL-Leiter auch eine langjährige Demonstration und Auswertung wichtiger Betriebseigenschaften benötigt.

Forschung und Entwicklung für neue klimafreundliche und ressourceneffiziente Verfahren spielen eine Schlüsselrolle, um energieintensive Branchen wie die Stahl- und Chemieindustrie auf zukünftige Klimaschutzanforderungen vorzubereiten und so deren Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. In der intelligenten Kombination von Prozessen, z. B. der Nutzung von Hüttengasen der Stahlproduktion als Grundstoff für die chemische Industrie, liegt ein hohes Innovationspotenzial. Als Alternative zur Nutzung von Abgasen kann auch regenerativ erzeugter Wasserstoff in der (Stahl-)Industrie zur Anwendung kommen und somit CO₂-Emissionen vermeiden.

Ein weiteres anspruchsvolles Ziel auf dem Weg zu einem CO₂-armen Industriesektor liegt in der Etablierung einer

nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Aus energetischer Sicht steht neben der konzeptionellen Abfallvermeidung die Wiederverwendbarkeit von Wertstoffen, Anlagen, Komponenten und Geräten, insbesondere die Aufarbeitung von Abfallströmen zu wiederverwertbaren Stoffen, im Fokus der Forschung. Denn diese benötigt heute eine Fülle energieintensiver Prozesse. Bei ganzheitlicher energetischer Betrachtung aller Stoffströme sollten mit dem Ziel höherer industrieller Recyclingquoten die für eine industrielle Folgenutzung notwendigen chemischen, physikalischen und stofflichen Eigenschaften ermittelt und standardisiert werden (siehe Kapitel 4.4.3). Diese Betrachtungen schließen auch die energieeffiziente Aufarbeitung von Rohwasser sowie industriellen und kommunalen Abwässern ein.

Querschnittsthemen

Viele Projektthemen treten in Zusammenhang mit Anwendungsfällen in verschiedenen Branchen oder in Prozessen unterschiedlicher Größenordnung mehrfach auf. Ziel einer effizienten Forschungsorganisation ist es, diese zu Querschnittsthemen zusammenzufassen. Beispielhaft werden folgende Querschnittsthemen genannt:

Bereits heute werden die Möglichkeiten von Digitalisierungsprozessen in den Unternehmen genutzt. Hemmnisse für eine breite Anwendung werden in der großen Individualität der entwickelten Lösungen gesehen. Dabei sollte sich die Informationstechnologie gerade wegen ihrer Nähe zur Mathematik und abstrakten Beschreibung der Wirklichkeit besonders eignen, generelle und umfassend anwendbare Lösungen anzubieten. Eine breit angelegte Demonstration konkreter Anwendungen und die Vermittlung ihrer technischen und wirtschaftlichen Vorteile in Modellprojekten sind notwendig, um den Transfer in die Breite der Unternehmenslandschaft zu unterstützen. Die Entwicklung eigener Methodenkompetenz auch in kleineren Unternehmen ist dabei ein weiteres wichtiges Entwicklungsziel.

Die mechanische Reibung ist ursächlich für Energieverluste bei allen Bewegungen und den sekundären Energieverbrauch durch die Folgen des Verschleißes. Die Disziplin der Tribologie ist durch eine enge Zusammenarbeit der physikalisch-chemischen Grundlagenforschung mit der stark anwendungsgetriebenen Entwicklung von Werk- und Schmierstoffen geprägt. Sie ist damit exemplarisch für die zunehmende Komplexität und Branchenvernetzung der Energieforschung.

Im Bereich der industriellen Prozesswärme existieren aufgrund der Vielzahl an Branchen und Prozessen bisher noch kaum übergreifende Konzepte. Für die Forschung gilt es daher, individuelle Wege zu finden, um die benötigte Wärmeenergie zu senken und gleichzeitig die Produktqualität beizubehalten. Wärme kann auch umweltfreundlich durch solare Energie oder in begrenztem Maße durch Biomasse bereitgestellt werden. Für höhere Temperaturen sind Verfahren zur Integration von Strom und Biomasse sowie zur Nutzung der Abwärme weiterzuentwickeln. Neben der direkten Nutzung über Wärmepumpen, Wärmenetze und Wärmespeicher in anderen Prozessen wird auch die Umwandlung in elektrische Energie erforscht.

Strukturen der FuE-Förderung

Der Adressatenkreis des Forschungsbereichs ist heterogen: Große Betriebe stehen neben KMU, Schwerindustrie neben Unternehmen mit moderatem Verbrauch und Forschungseinrichtungen neben Ingenieurbüros. Diese Vielschichtigkeit in der Projektförderung aufzugreifen, ist wichtig und sinnvoll. Denn einerseits sollen sämtliche Forschungsfragen der Förderung zugänglich sein. Andererseits können jedoch ähnliche Fragestellungen in verschiedenen Skalierungen wiederkehren und durch Verbundforschung effizient gelöst werden. Dies schafft die Voraussetzungen für Ansätze und Lösungen, die Aussicht auf eine breitenwirksame praktische Umsetzung haben.

Frühere Umbauten der Energieversorgung haben bereits zu einer Anpassung der Fertigungsprozesse geführt. In der Industrie der Energiewende besteht gleichwohl weiterer Bedarf, bereits abgeschlossene Forschungs- und Entwicklungsergebnisse im vorwettbewerblichen Bereich einer Demonstration zuzuführen. In Experimentierräumen lassen sich unkonventionelle, zukunftsfähige Konzepte ausprobieren. Mit Blick auf die Ziele der Energiewende ist es besonders wichtig, die in einem geförderten Unternehmen gewonnenen Erkenntnisse anschließend so aufzubereiten und zu nutzen, dass möglichst viele weitere Anwendungsfälle inner- und außerhalb der Branche aufgegriffen werden. Dieser Ergebnistransfer wird im Rahmen von Modellprojekten, die auf einer regionalen oder Branchenstruktur aufbauen, besonders unterstützt.

In Demonstrationsprojekten wird erstmalig die Machbarkeit neuartiger Verfahrenskonzepte im industriellen Großmaßstab aufgezeigt. Diese sind deshalb für den nächsten Schritt in Richtung Markt für die neuen Technologien von

großer Bedeutung, da die Hochskalierung im Regelfall noch einmal Entwicklungen im Bereich Fertigung, Sonderbau und Einbau erforderlich macht. Best-Practice-Projekte können durch ihre Vorbildfunktion zu einer öffentlichen Verbreitung der Ergebnisse und damit zu einer beschleunigten Marktdurchdringung neuer, hocheffizienter Technologien und Verfahren führen. Zudem kommt der Analyse wirtschaftlicher, rechtlicher und ökonomischer Hürden und Hemmnisse für die Nachfrageflexibilisierung eine besondere Rolle zu. Innovative Konzepte, zu deren Umsetzung Anpassungen des regulatorischen Rahmens notwendig sind, können gegebenenfalls in systemisch angelegten Reallaboren erprobt werden (siehe Kapitel 3.1). Die Gesellschaft sollte eingebunden werden (z. B. über Stakeholder-Dialoge), um sowohl eine Sensibilisierung als auch die soziale Akzeptanz der Nachfrageflexibilität zu gewährleisten.

Neben Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsprojekten werden auch marktnahe, wissenschaftlich begleitete Modellprojekte zur Energieeffizienz und erneuerbarer Wärme in Industrie und Gewerbe gefördert. Sie adressieren den Transfer von Forschungsergebnissen zu innovativen Technologien und Verfahren in die betriebliche Praxis. Als innovative Best-Practice-Projekte sollen sie durch ihre Vorbildfunktion die Verbreitung und Marktdurchdringung hocheffizienter Technologien beschleunigen.

Begleitforschungsprojekte werten die Arbeitsprogramme und die Ergebnisse der Forschungs-, Demonstrations- und Modellprojekte aus, um ein zügiges Ausnutzen von Innovationschancen zu ermöglichen. Auf Basis der Analysen werden Handlungsempfehlungen für zielgerichtete FuE- und Diffusionsaktivitäten erarbeitet. Neben dem Erkennen wichtiger Innovationen sind auch Möglichkeiten der Übertragbarkeit von Technologien auf weitere Anwendungsgebiete auszuloten.

Um eine gezielte, bedarfsgerechte Forschung zu ermöglichen und Fördermaßnahmen effizient zu halten, wurde im Forschungsbereich IGHD das *Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe* etabliert. In Forschungsfeldern zu ausgewählten Schlüsselthemen sowie Themen von übergeordneter Bedeutung werden Forschungsaktivitäten längerfristig gebündelt. Jedes Forschungsfeld identifiziert und priorisiert Forschungslücken, arbeitet koordiniert auf weitere Forschungsergebnisse hin und bereitet den Transfer vor. Im *Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe* finden aber auch innovative, nicht zusammenhängende Einzelthemen Berücksichtigung, die aufgrund der

hohen Diversifizierung und Spezialisierung von Hochtechnologiebereichen nicht in einem eigenen Schlüsselthema aggregiert werden. Die übergreifende Vernetzung verschiedener Industriebranchen hat eine besondere Bedeutung, da Schlüsselthemen aus einzelnen Forschungsfeldern zumeist eine Vielzahl weiterer Forschungsfelder betreffen, deren Potenziale erst durch die übergreifende Zusammenarbeit vollständig erschlossen werden können.

4.1.3 Schnittstellen der Energieforschung zu Mobilität und Verkehr

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

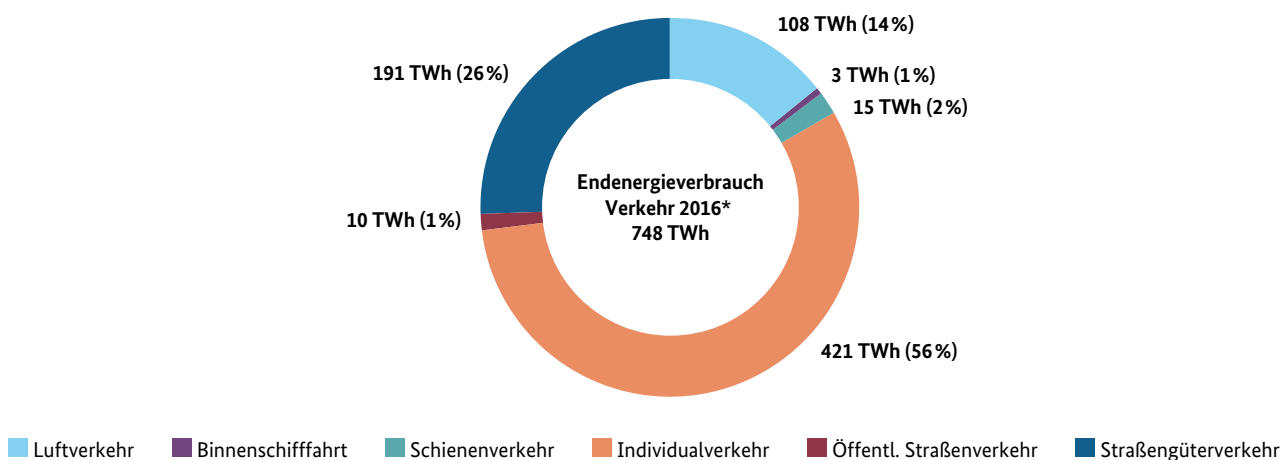
Auf den Verkehr entfallen 29 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland, weshalb die Schnittstellen des Energiesektors zum Bereich Mobilität und Transport auch im Fokus der Energieforschung stehen. So kann im Rahmen der Sektorkopplung Strom aus erneuerbaren Energiequellen auch in diesem Bereich eingesetzt werden. Entweder direkt, z. B. batterie-elektrisch, oder indirekt über die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe. Daher sind auch Rückwirkungen solcher Entwicklungen im Verkehrssystem auf das Energiesystem zu berücksichtigen. Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität (und des autonomen Fahrens) sind beispielsweise bei der Technologie- und Konzeptentwicklung für die Verteilnetze, aber auch bei der energetischen Quartiersplanung zu beachten. Die Digitalisierung und Vernetzung der Akteure sowie innovative, multimodale Mobilitätskonzepte, klimagerechtes Nutzerverhalten und Gestaltung im Quartier können dazu beitragen, den Energieverbrauch ganzheitlich zu optimieren und Fortschritte bei der Elektrifizierung des Verkehrs zu erleichtern. Weitere Schnittstellen ergeben sich z. B. über die Bioenergie als Systemintegrator oder aus Fragen des Transports chemischer Energieträger zur Speicherung erneuerbarer Energie. Die Forschungsförderung im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms setzt deshalb an diesen Schnittstellen an und fördert die Forschung und Entwicklung im Bereich des Energiesystems unter Berücksichtigung der Entwicklungen im Verkehrsbereich. Maßnahmen des Energieforschungsprogramms mit unmittelbarem Bezug zu Mobilität und Verkehr werden mit dem Verkehrsressort eng abgestimmt. So werden Überschneidungen vermieden und Synergien gehoben. Relevante Ergebnisse aus Aktivitäten der Verkehrsforschung im Rahmen weiterer Programme der Bundesregierung werden in der Energieforschung berücksichtigt.

Der Bereich Mobilität und Verkehr erlebt zurzeit eine sehr dynamische Entwicklung. Digitalisierung und Elektrifizierung sowie Modelle der Sharing Economy beeinflussen die zukünftige Mobilität enorm. Carsharing, autonomes und vernetztes Fahren, intermodale Reisewege, beispielsweise unter Einbeziehung von Elektrorollern und Elektro-Fahrrädern, sind nur Beispiele für diese Entwicklung. Deren Auswirkungen auf das Energiesystem lassen sich derzeit kaum abschätzen. Insgesamt scheint der Trend in Richtung größerer Verkehrsleistungen zu gehen. Ob dies mit einer Erhöhung des Energieverbrauchs verbunden ist, hängt von der Entwicklung der Energieeffizienz im Gesamtsystem ab. Die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrssektors bietet Chancen und Herausforderungen für den Energiesektor. Elektromobilität als Effizienztechnologie ist ein Baustein nachhaltiger Mobilität und spielt ihren Umwelt- und Klimavorteil bei Einsatz erneuerbaren Stroms voll aus. Daneben kann das gesteuerte Laden und Entladen (Vehicle-to-Grid) von Batteriefahrzeugen zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen. Allerdings stellt Elektromobilität zusätzliche Anforderungen an die Flexibilität des Energiesystems und die Ressourceneffizienz. Für den langfristigen Erfolg der Elektromobilität werden daher auch verstärkte Anstrengungen in der Batterieforschung benötigt. Aber auch Brennstoffzellen sind ein Teil der Elektromobilität.

Alternativ können neuartige, verbesserte Kraftstoffe (z. B. Biokraftstoffe aus Abfall- und Reststoffen, Kraftstoffe aus erneuerbarer elektrischer Energie oder Solar Fuels) erneuerbare Energien in die noch weiter auszubauende Infrastruktur (Tankstellen, Verbrennungsmotoren) integrieren. Dabei müssen hohe Maßstäbe an die Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der Erzeugung und Bereitstellung angelegt werden. Die Erzeugung synthetischer Kraftstoffe mit erneuerbarem Strom (Power-to-Fuel) sollte dabei in Anlagen erfolgen, die einen systemdienlichen Betrieb ermöglichen oder das inländische Stromsystem nicht beeinflussen (Umsetzung von Power-to-Fuel aus Kostengründen im Ausland).

Die solare Produktion (künstliche Photosynthese) chemischer Energieträger (Solar Fuels) und Wertstoffe aus praktisch unbegrenzt verfügbarem Sonnenlicht, Wasser und Bestandteilen der Luft (CO₂ oder Stickstoff) kann mittelfristig wichtige Beiträge zur globalen Energiewende und zum Klimaschutz leisten. Für Deutschland ergeben sich in diesem Kontext Möglichkeiten für die saisonale Speicherung erneuerbarer Energien, die stoffliche und energetische Versorgung der Chemie- und Grundstoffindustrie, den Export von hochwertiger Anlagentechnik sowie den Import solarer Kraft- und Wertstoffe aus Regionen mit höherer Son-

Abb. 9: Endenergieverbrauch für Verkehr in Deutschland in 2016*



* vorläufige Angaben

Quelle: Statistisches Handbuch Verkehr in Zahlen 2017/2018 des BMVI

Daten ohne Seeschifffahrt im Inland („Short Sea Shipping“), da nicht von der übrigen Seeschifffahrt getrennt erhoben; Schienenverkehr umfasst Inlandsabsatz von Eisenbahn, U-Bahn und Straßenbahn; Individualverkehr umfasst den Straßenverkehr von Personen mit Pkw, Krafträder, Mopeds, Mofas und Mokicks; Öffentlicher Personenverkehr umfasst den Straßenverkehr mit Kraftomnibussen; Güterverkehr umfasst den Straßenverkehr mit Lastkraftwagen, Sattelzügen und Zugmaschinen, einschließlich sonstiger Kfz; Binnenschifffahrt umfasst den Verkehr einschließlich Hafen- und Küstenschifffahrt.

neneinstrahlung (insbesondere Wüstenregionen). Um diese Chancen zu nutzen, sind weitere Innovationen und technologische Fortschritte notwendig. Dabei ist eine verstärkte Koordination zwischen thematisch breit angelegter Grundlagenforschung und industrieller Forschung anzustreben.

Die Bereitstellung von Antriebsleistung über alternative Kraftstoffe erfordert weit mehr erneuerbare Energie als die direkte Nutzung in einem Elektromotor. Der schlechteren Energieeffizienz steht aber eine bessere Speicherbarkeit gegenüber. Hinzu kommen die globale Transportierbarkeit sowie gegebenenfalls günstigere Gesamtsystemkosten. Denn batterie-elektrische Antriebe für Flugzeuge oder Schiffe, die Antriebsenergie für Tausende von Kilometern mit sich führen müssen, sind technisch kaum zu realisieren. Die jeweiligen Anteile von synthetischen Kraftstoffen und batterie-elektrischer Mobilität lassen sich in einem Energiesystem der Zukunft aus heutiger Sicht nicht abschätzen. Deshalb adressiert das 7. Energieforschungsprogramm sowohl die Produktion und Nutzung alternativer Kraftstoffe als auch die Forschung und Entwicklung zu Batterien und Brennstoffzellen für die Bereitstellung von Antriebsenergie. Für alle technologischen Optionen sind erhebliche Forschungsanstrengungen an der Schnittstelle zwischen Energie- und Verkehrssektor erforderlich.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Aus energiewirtschaftlicher Sicht sind innovative Speichersysteme wie die Batterie und die effiziente Einbindung in das Energiesystem entscheidende Bausteine für das Gelingen der Elektromobilität und ihre Integration in die Energiewende. Eine nachhaltige batterie-elektrische Elektromobilität verlangt die Betrachtung der Wertschöpfungskette von den Rohstoffen über die Produktion und Nutzung bis hin zu Nachnutzung und Recycling von Batterien. Die größten Herausforderungen bei Batterien für Elektrofahrzeuge stellen die Verbesserung der Reichweiten sowie die Schnellladefähigkeit dar. Die dazu notwendigen technischen Entwicklungen zeigen sich bereits bei der Konzeptionierung und Fertigung der Batteriezelle. Auch der Ausbau einer optimierten Ladeinfrastruktur mit entsprechender Technik zum Laden und Lastmanagement gewinnt an Bedeutung. Hinzu kommen intelligente Batteriemanagementsysteme (BMS) in den Elektrofahrzeugen, die Leistungselektronik, unterschiedliche Ladetechnologien (z.B. induktives, also kabelloses Laden), fortschrittliche netzdienliche und batterieschonende Ladestrategien

und ein benutzerfreundlicher Zugang zu Lademöglichkeiten für Elektro- und Hybridfahrzeuge. Die Umstellung des Straßenverkehrs auf eine nachhaltige Energieversorgung steht im Fokus von Forschung und Entwicklung zur Elektromobilität. Allerdings sollen auch weitere Anwendungsbereiche (z. B. Landmaschinen, Nutzfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge, Lieferdrohnen) berücksichtigt werden.

Mit Brennstoffzellenfahrzeugen können im Vergleich zu Batteriefahrzeugen höhere Reichweiten bei kürzeren Tankvorgängen erzielt werden. Bei der Integration der Brennstoffzelle in mobile Anwendungen wird die Aufmerksamkeit auf das Komplettsystem hinsichtlich Betriebsführung inklusive Froststart, Lebensdauer, Effizienz und Wartung gelegt. Hybridsysteme aus Brennstoffzellen, Batterien und Verbrennungsmotoren werden mit Blick auf spezifische Anwendungsfälle entwickelt. Eine wichtige Voraussetzung für die Markteinführung ist der Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur mit Wasserstofftankstellen. Der investive Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur wird im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie unterstützt. Die damit einhergehenden Forschungsfragen zu Erzeugung, Speicherung und Transport des Wasserstoffs werden im Zusammenhang mit der Sektorkopplung betrachtet.

Die Herstellung alternativer Kraftstoffe setzt in vielen Fällen die elektrolytische Wasserstoffherzeugung voraus. Es sind aber auch biogene und solare Erzeugungspfade möglich. Für die Produktion der meisten alternativen Kraftstoffe wird eine nachhaltige Kohlenstoffquelle benötigt. Neben der direkten CO₂-Abscheidung aus der Luft kommen verschiedene Punktquellen in Betracht. Daraus ergeben sich Verknüpfungen mit der Forst- und Landwirtschaft sowie der Abfallwirtschaft (Biomasse sowie biogene Rest- und Abfallstoffe für Biokraftstoffe, Nutzung von CO₂ aus Biogasanlagen, Einsatz von alternativen Kraftstoffen in Landmaschinen) und der Industrie (Nutzung von CO₂ aus Industrieprozessen, Verwendung alternativer Gase einschließlich Biomethan für BHKW und Hochtemperaturwärmeprozesse). Technologisch-ökonomische Bewertungen der unterschiedlichen Erzeugungspfade sollen unter Berücksichtigung des Lebenszyklus und der gesamten Wertschöpfungskette vorgenommen werden. Dies betrifft insbesondere auch die Biokraftstoffe. Mit der Einführung alternativer Antriebskonzepte und Kraftstoffe sind regulatorische Fragen sowie Fragen zur gesellschaftlichen Akzeptanz zu klären.

Künstliche Photosynthese bezeichnet die Produktion chemischer Energieträger oder Wertstoffe mittels Sonnenlicht als einziger oder wesentlicher Energiequelle. Hierunter fällt eine Vielzahl von Verfahren unterschiedlicher technologischer Reife. Beispiele für entsprechende Themen der Grundlagenforschung sind die Entwicklung biologisch inspirierter Lichtabsorber sowie hocheffektiver Katalysatoren, die genetische Manipulation von Bakterien und Algen zur direkten Produktion solarer Kraft- und Wertstoffe oder die Entwicklung hochintegrierter photo-elektrochemischer Zellen auf Halbleiterbasis. Die thematische Vielfalt ist im Bereich der Grundlagenforschung sehr groß und mit Blick auf die mögliche Entwicklung von Sprunginnovationen auch sinnvoll. Die künstliche Photosynthese ist aber kein reines Grundlagenthema mehr. Die indirekte Kopplung von Photovoltaik und Elektrolyseanlagen ist zum Beispiel bereits Gegenstand der industriellen Entwicklung. Auch thermochemische Verfahren, bestimmte Bioreaktoren oder manche photo-elektrochemische Zellen könnten mittelfristig die Marktreife erreichen. Sie sind damit ein Thema für die industrielle Energieforschung.

Neben der Forschung zu technologiespezifischen Einzelfragen sollte eine gute Skalierbarkeit entwickelter Technologien (etwa im Terawatt-Bereich im Jahr 2050) so früh wie möglich berücksichtigt werden. Eine schnelle energetische Amortisation unterstützt die Skalierbarkeit. Die verwendeten Materialien sollten breit verfügbar und ungiftig sein. Bei der Anlagentechnik ist auf Recyclingfähigkeit zu achten (siehe Kapitel 4.4.3).

Strukturen der FuE-Förderung

Die Forschung an der Schnittstelle zwischen Energie- und Verkehrstechnologien ist durch eine große Themenbreite gekennzeichnet, die von der Entwicklung von Batterien und Brennstoffzellen über die biogene und solare Erzeugung alternativer Kraftstoffe bis zu strombasierten Verfahren reicht. Im 7. Energieforschungsprogramm werden die technologischen Entwicklungsbedarfe dieser Schnittstelle auch in den Forschungsbereichen Gebäude und Quartiere (siehe Kapitel 4.1.1), Bioenergie (siehe Kapitel 4.2.3), Stromnetze (siehe Kapitel 4.3.1), Stromspeicher (siehe Kapitel 4.3.2) und schwerpunktmäßig Sektorkopplung (siehe Kapitel 4.3.3) behandelt.

Die Erforschung und Erprobung von Erzeugungspfaden für alternative Kraftstoffe im industriellen Maßstab, die Erprobung dieser Kraftstoffe in Feldversuchen und der testweise Aufbau einer Energieinfrastruktur wird umfangreiche Forschungsarbeiten erfordern. Durch die Anbindung der Umwandlungsanlagen an das Stromnetz nehmen diese eine systemische Dimension an und sind damit ein mögliches Thema für die Reallabore der Energiewende (siehe Kapitel 3.1). Energie- und Verkehrsforschung müssen hierbei eng zusammenarbeiten.

Einen wichtigen Beitrag zum Ergebnistransfer leistet die Begleitforschung zur Förderinitiative Energiewende im Verkehr. Basierend auf den Forschungsergebnissen im energie- und verkehrswissenschaftlichen Kontext werden übergeordnete Trendanalysen und Perspektivkonzepte abgeleitet, um zukünftig noch gezielter auf Forschungsbedarfe eingehen zu können.

An vielen Orten der Welt finden intensive FuE-Aktivitäten zu Elektromobilität inklusive Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie sowie zu solar-, biogen oder strombasiert hergestellten Kraftstoffen statt. Im SET-Plan, im EU-Förderprogramm „Horizon 2020“ und im Nachfolgeprogramm „Horizon Europe 2021 – 2027“ wird u. a. das Ziel verfolgt, eine Batteriezellproduktion in Europa zu etablieren (TWG 7 zu Batterien, European Battery Alliance). Europäische Kooperationen sind sinnvoll für den Austausch und eine Risikoteilung bei den Entwicklungserfordernissen für Speicher, stationäre und mobile Anwendungen. Sehr dringlich ist eine internationale Zusammenarbeit zum Thema Standardisierung und Schnittstellen.

Das Thema der künstlichen Photosynthese adressiert die im Rahmen von Mission Innovation gegründete Converting Sunlight Innovation Challenge. Aufgrund der diesem Themenkomplex inhärenten globalen Aspekte ist diese internationale Kooperation ein Schwerpunkt der Forschungsförderung (*Berliner Modell*). Kooperationen mit Regionen des globalen Südens können auch im Rahmen von Projekten zur wissenschaftlich-technischen Zusammenarbeit (siehe Kapitel 6.1) adressiert werden. Auf nationaler Ebene sollen Vernetzung und Ergebnistransfer in diesem Bereich unter dem Dach der *Forschungsnetzwerke Energie* intensiviert werden.



4.2 Energieerzeugung

4.2.1 Photovoltaik

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

In der Photovoltaik (PV) wird die Sonnenstrahlung direkt mittels einer Solarzelle in elektrische Energie umgewandelt. Dabei kommen halbleitende Materialien zum Einsatz. Dafür wird heute überwiegend Silizium eingesetzt, aber auch andere Materialien wie Verbindungshalbleiter oder anorganische und organische Dünnschichtsysteme. Die Photovoltaik hilft als mindestens im Betrieb emissionsfreie Technologie (keine Lärm- und Geruchsbelästigung, oder Schadstoffemissionen), die Treibhausgasemissionen zu mindern. PV-Anlagen sind durch einen skalierbaren, modularen Aufbau in ihrer Größe zwischen Kleinanlage und Großkraftwerk flexibel einsetzbar, wartungsarm und bilden durch die einfache Adaption an unterschiedlichste Einsatzbedingungen eine wichtige Basis für die Energiewende.

Ziel der Bundesregierung ist es, die Energiebereitstellung sicher, wirtschaftlich und umweltverträglich zu gestalten und dabei eine maximale Verlässlichkeit sicherzustellen. Aktuelle Studien belegen, dass sich der abgestimmte Einsatz von Photovoltaik und Windkraft dazu sehr gut eignet.

Netzschwankungen, verursacht durch Wechsel der lokalen Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeit, werden durch die Kombination beider Technologien gemindert. Deshalb gelten diese beiden nachhaltigen Technologien als tragende Säulen der Energiewende. Charakteristisch für die Photovoltaik ist eine breite Wertschöpfung von der Gewinnung und Aufbereitung der Roh- und Hilfsstoffe über die Produktionsmittel- und Komponentenfertigung bis hin zu Installation, Anlagenbetrieb (inkl. Contracting- oder Mieterstrommodellen), Netz- bzw. Speicheraspekten sowie Recycling-Optionen. In diesem Kontext bieten sich auch für Startups vielfältige Möglichkeiten.

Die Entwicklung des Photovoltaik-Weltmarkts weist seit den 2000er Jahren durchschnittliche Wachstumsraten von über 30 Prozent pro Jahr auf. Für 2018 wird der Zubau auf 100 GW geschätzt. Deutschland hat mit seiner Vorreiterrolle in Forschung, großtechnischer Umsetzung und Markteinführung einen großen Anteil an dieser Entwicklung. Die stetige Weiterentwicklung der Produktionstechnik hat wesentlich dazu beigetragen, die Kosten für Solarstrom in Deutschland von 50 Cent/kWh im Jahr 2000 auf heute unter 6 Cent/kWh zu senken.

Um diese hohe Qualität der Produkte sowie fortschrittliche und innovative Technologien und Produktionsverfahren

konsequent weiterzuentwickeln und die Breite der nationalen Wertschöpfung bei hohem internationalen Wettbewerbsdruck zu erhalten und auszubauen, sind kontinuierliche Forschungsaktivitäten essenziell. Die strategischen Ziele der FuE-Förderung sind an das dynamische und kompetitive Umfeld anzupassen und richten sich auf folgende Aspekte:

Für eine konkurrenzfähige Photovoltaikindustrie und eine erfolgreiche weltweite Energiewende ist es notwendig, die Kostensenkungspotenziale bei steigender Produktqualität entlang der gesamten Wertschöpfungskette auszuschöpfen. Dabei geht es um eine kontinuierliche Steigerung des Wirkungsgrads und der Produktivität, um verminderten Ressourcenverbrauch- und Flächenverbrauch, eine längere Lebensdauer und eine vereinfachte Verwertung nach Gebrauch.

Eine Hauptaufgabe besteht darin, neue Materialien und Technologien bis zur Produktionsreife weiterzuentwickeln sowie deren Kosteneffizienz nachzuweisen. Damit einhergehend soll der Aufbau von Produktionen (vom Rohstoff über die Solarzelle und -modul bis zum System) mit industriellem Durchsatz zur Ausnutzung von Skaleneffekten ermöglicht werden, unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienz und Umweltverträglichkeit.

Ferner erfordern diverse Anwendungen maßgeschneiderte Produktlösungen, wie z. B. gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV). Diese Märkte werden langfristig einen größeren Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten, da sie großes Potenzial zur Sektorkopplung mit anderen Disziplinen wie der Gebäudetechnik (inkl. photovoltaisch-thermischen Kollektoren) oder der Mobilität bieten. Sie stellen Anforderungen an die Technologie, die über die reine Fokussierung auf Stromerzeugung hinausgehen. Weiterhin steht die Integration der PV in die Energiesysteme unter Beibehaltung der Versorgungsqualität im Fokus.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Orientiert an diesen strategischen Zielen lassen sich folgende Themen für eine Förderung identifizieren:

- Der Photovoltaik-Maschinenbau in Europa beliefert einen internationalen Kundenkreis mit industriell wettbewerbsfähigen Produktionsanlagen und hocheffizien-

ten Prozessen, z. B. Laserprozesse oder Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Es ist notwendig, dass sich die heimischen Unternehmen stets mit Innovationen von der internationalen Konkurrenz abheben, um in kürzeren Zeiträumen über effizienzsteigernde technologische Weiterentwicklungen Kostensenkungspotenziale zu erzielen. Dabei müssen durch Prozesskontrolle, Logistik- und Automatisierungskonzepte das Fabrik-Layout und die Servicequalität verbessert werden. Dies kann durch Nutzung umfassender Überwachungs-, Analyse- und Prognosetechnik im Zuge der Digitalisierung (Big-Data-Analyse) und Automatisierung sowie über die sich selbst überwachende und steuernde Fabrik (Industrie 4.0) erfolgen.

- Ferner sind die Verbesserung der Lebensdauer und Qualitätssicherungsmaßnahmen auf Systemebene für eine verlässliche Energiebereitstellung zu nennen. Hierzu gehören Analysen der Degradationsmechanismen und eine damit einhergehende Entwicklung angepasster Mess- und Simulationstechniken sowie Aspekte der automatisierten Systemwartung.
- Eine weiter verbesserte Wirtschaftlichkeit ist für die Akzeptanz und die industrielle Anwendung neuer Technologien ausschlaggebend. Daher sind für die Weiterentwicklung von Prozessen vom Material bis ins Modul sowie des zugehörigen Prozessequipments Pilotversuche mit vorindustriellen Demonstrationsanlagen von großer Bedeutung. Dafür ist eine geeignete industrielle Entwicklungsplattform notwendig.
- Neue PV-Materialien unterscheiden sich in Herstellung und Verarbeitung von den etablierten Technologien. Sie lassen sich größtenteils flexibel produzieren und sind kostengünstig hinsichtlich Materialeinsatz, Herstellung und Verarbeitung. Einige Technologien weisen aber noch Defizite bei der Lebensdauer oder der Effizienz auf und haben daher andere Anwendungsfelder als die bekannten Technologien. Ihr Nutzen für diese spezifischen Anwendungen und ihre Vorteile müssen klar erkennbar sein. Beispielsweise ermöglichen Konzepte zur Entwicklung hocheffizienter Tandemsolarzellen auf Basis des kristallinen Siliziums (z. B. in Kombination mit Perowskit-Halbleitern) oder Dünnschichtsolarzellen weitere Wirkungsgradsteigerungen. Besonders interessant sind dabei Innovationen, die sich in bestehende Produktionsverfahren integrieren lassen.

- Zur Deckung des Energieverbrauchs mit regenerativen Energien hat die Gebäudeintegration von PV-Modulen (BIPV) unter Einschluss innovativer Prozesstechnik bei architektonisch attraktiver Gestaltung eine hohe energiepolitische Bedeutung. Die BIPV weist den Weg für verwandte, maßgeschneiderte Produktlösungen in weiteren Anwendungsfeldern wie der transportmittelintegrierten Photovoltaik (VIPV).
- Auf der Systemebene wird bei der Erschließung neuer Märkte eine noch engere Abstimmung mit den Netzbetreibern notwendig. Bezogen auf das PV-System selbst besteht FuE-Bedarf in der PV-Ertragsprognostik zur Minderung von Investitionsrisiken und Sicherung der Stromversorgung. Dies betrifft auch neuartige Steuerungs- und Regelungssysteme. Hierbei sind Netzzrückwirkungen und Netzbeeinflussung zu berücksichtigen. Dies verdeutlicht: Es sind weitere Entwicklungen in der Systemtechnik durch Etablierung einer neuen Generation von PV-Großkraftwerken mit netzdienlichen Eigenschaften für das Verbundnetz notwendig. Daneben soll die Forschung für eine umweltfreundliche und sichere Stromversorgung in Inselnetzen (Off-Grid-Systeme) fortgeführt und um weitere Aspekte der Versorgungssicherheit erweitert werden. Bei der Entwicklung von Systemtechnik sollen auch die im Zuge des weiteren Ausbaus der PV-Erzeugungskapazitäten zunehmenden Landnutzungskonflikte adressiert werden. Beispielsweise können Anlagenbauer und Installateure in diesem Bereich mit Innovationen die heimische Wertschöpfung vergrößern, attraktive Lösungen für den Export entwickeln und zur Stärkung der hohen Akzeptanz von PV-Anlagen beitragen.
- Gesundheits- und umweltgefährdende Materialien gilt es soweit wie möglich in der Herstellung zu vermeiden. Knappe Ressourcen gilt es zu schonen. Eine konsequente Verwertung nach Gebrauch dient der Nachhaltigkeit von PV-Systemen. Gleichzeitig sind begleitende Untersuchungen zu sozio-ökonomischen Aspekten sowie Lebenszyklusanalysen durchzuführen.

Strukturen der FuE-Förderung

Der vornehmliche FuE-Bedarf liegt in der industrienahen Forschung mit schneller wirtschaftlicher Umsetzung, bevorzugt über Verbundprojekte, an denen Unternehmen

(PV-Industrie, Material- und Anlagenhersteller, Anbieter von Photovoltaik-Systemtechnik), Forschungseinrichtungen und Universitäten mitwirken. Die Vernetzung der verschiedenen Akteure und den erfolgreichen Transfer von Forschungsergebnissen soll das *Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien – Photovoltaik* gewährleisten. Mit Blick auf die gebäudeintegrierte Photovoltaik und die Integration der Photovoltaik in das Energiesystem wird dies in Abstimmung mit den Forschungsnetzwerken *ENERGIEWENDEBAUEN* und *Stromnetze* erfolgen.

Für die Weiterentwicklung von Prozessanlagen im industrierelevanten Maßstab kommt eine Forschungsförderung in den Reallaboren der Energiewende in Betracht.

Die Ausrichtung der Forschungsförderung im Bereich der Photovoltaik ist abgestimmt auf die Aktivitäten im europäischen Rahmen, insbesondere zum European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) zur synergetischen Stärkung der europäischen Volkswirtschaften. Dieser sieht vor, dass die Effizienz der etablierten Technologien bis 2030 relativ zu 2015 um 35 Prozent gesteigert wird. Die Kosten der Schlüsseltechnologien sollen um 50 Prozent gesenkt, die Lebensdauer und Nachhaltigkeit der Produkte signifikant verbessert werden. Zudem sollen Konzepte zur Reduktion der Installationskosten und Skaleneffekte in der Produktion zur Etablierung einer erneut starken Solarmodulproduktion in und für Europa beitragen. Auch bei der Realisierung des „Null-Energie-Gebäudes“ soll die Photovoltaik hinsichtlich Energieleistung, Kostenreduktion und Ästhetik einen entscheidenden Anteil haben. Zur Umsetzung dieser Ziele wird die Schwerpunktsetzung zum SET-Plan Implementierungsplan für die Photovoltaik berücksichtigt. In diesem Plan wurden gemeinsame strategische Vorhaben definiert: „PV for BIPV and similar applications“, „Technologies for silicon solar cells and modules with higher quality“, „New Technologies & Materials“, „Operation and diagnosis of photovoltaic plants“, „Manufacturing technologies“ und „Cross-sectoral research at lower Technology Readiness Level (TRL)“. Eine engere europäische Forschungskooperation wird unter anderem durch die Beteiligung an European Research Area (ERA) – Net-Aktivitäten und bilateralen Kooperationen nach dem *Berliner Modell* – realisiert. Ergänzt werden die europäischen Kooperationen durch einen zielgerichteten Austausch im Technology Collaboration Programme der Internationalen Energieagentur (IEA) zu Photovoltaik-Systemen (PVPS).

4.2.2 Windenergie

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Die Windenergie hat 2017 bei einer installierten Leistung von über 56 Gigawatt (GW) mehr als 105 Terawattstunden Strom produziert, was einer durchschnittlichen Leistung von rund 12 GW entspricht.³ Damit belief sich der Windanteil an der deutschen Bruttostromerzeugung auf mehr als 16 Prozent. Die deutlich höhere Volllaststundenzahl von Offshore-Windenergieanlagen führt dazu, dass die in Nord- und Ostsee installierten Anlagen über 17 Prozent der Energie beitrugen, obwohl sie lediglich knapp 10 Prozent der installierten Leistung darstellen (5,4 GW). In der Tendenz weisen die Ausschreibungsergebnisse für künftige Windenergieanlagen auf fallende Gestehungskosten hin. Die neuen und erwarteten Anlagengenerationen zeigen einen starken Trend hin zu erhöhten Volllaststundenzahlen auf.

Da die Windenergie mit fünf bis acht Gramm je Kilowattstunde sehr geringe spezifische Kohlendioxidemissionen aufweist, kann sie einen besonders hohen Beitrag zum Ziel der Bundesregierung leisten, bis 2030 eine Emissionsreduzierung um 55 Prozent gegenüber 1990 zu erreichen. Für die Windenergie besteht auch deshalb ein weiterer großer Ausbaubedarf, weil neue Stromanwendungen wie die Elektromobilität oder Wärmepumpen mit einer zusätzlichen Stromnachfrage verbunden sein werden. Die Deckung dieser Nachfrage sowie die angestrebte Treibhausgasminde- rung sind nur mit erneuerbaren Energien zu erreichen.

Neben den Zielen zur Reduktion der Treibhausgase ist die Windbranche aufgrund ihrer starken Wettbewerbsposition mit einem hohen Exportanteil ein wichtiger Arbeitgeber, der zudem aufgrund der logistischen Herausforderungen oft in strukturschwachen Regionen angesiedelt ist. Beispielsweise lassen sich die auf Werften vorhandenen Kenntnisse im Bau maritimer Großstrukturen auf die Fertigung von Offshore-Windenergieanlagen übertragen. Auch in der Bau- und besonders in der Betriebsphase bietet die Windenergie verlässliche Arbeitsplätze, sodass sich für viele vom Strukturwandel betroffene Menschen neue Beschäftigungsmöglichkeiten bieten (vgl. Cuxhavener Appell 2.0, 2017)⁴.

Um das energiepolitische Dreieck einer zuverlässigen, bezahlbaren und umweltschonenden Energieversorgung auch in Zukunft bestmöglich zu erfüllen, ist ein umweltschonender, von der breiten Mehrheit der Bevölkerung getragener, kosteneffizienter Ausbau der Windenergie erforderlich. Deshalb sollen auch in Zukunft Beiträge zur Kostensenkung und zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Windenergie im Fokus der Forschungsförderung stehen. Die Förderung soll dabei unterstützen, dass künftige Anlagen nochmals leistungsstärker, zuverlässiger und mit einer höheren Volllaststundenzahl zur Verfügung stehen werden. Damit kann Strom zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitgestellt werden, auch an bisher schwierigen Standorten. Die Akzeptanz des Zubaus soll auch durch geeignete Partizipationsprozesse und innovative technische Lösungen unterstützt werden. Die im Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm geäußerten Erwartungen verschiedener Akteure aus dem Bereich Windenergie werden sich nur dann erfüllen lassen, wenn eine auf hohem Niveau befindliche und zugleich breit aufgestellte Forschung fortgeführt wird. Sie kann beispielsweise auch im Rahmen eines Offshore-Testfelds erfolgen. In Zukunft werden ganzheitliche Betrachtungen eine noch größere Rolle bei der Windenergieforschung spielen, vor allem um Konflikte zwischen unterschiedlichen Interessen zu vermeiden, so z. B. die Gewährleistung der Verkehrssicherheit bei der Luft- und Seeschifffahrt.

Strategisch wichtige FuE-Themen

In Deutschland stehen für einen weiteren Ausbau der Windenergie grundsätzlich noch ausreichend nutzbare Flächen on- und offshore zur Verfügung. Einfach erschließbare, windhöfliche Standorte an Land werden jedoch seltener, sodass der Ausbau vermehrt im komplexen Gelände erfolgen muss. Es ist daher essenziell, mit geeigneten Verfahren potenziell gute Standorte auszuwählen und dann mit möglichst preiswerten Methoden den Standort über einen längeren Zeitraum zu erkunden. Hierzu können verbesserte Algorithmen oder preisgünstigere Erkundungsmethoden, die Messmasten entbehrlich machen, beitragen. Nicht nur für künftige Repowering-Vorhaben ist bei voraussichtlich sinkenden Margen ein sorgfältiges Parklayout vonnöten, das sich z. B. auf die in der Vergangenheit

3 Das Verhältnis von installierter Leistung zu durchschnittlicher Leistung wird als Nutzungsgrad bezeichnet.

4 Das Dokument ist im Internet verfügbar unter: https://www.mw.niedersachsen.de/download/122456/Cuxhavener_Appell_2.0_im_Wortlaut.pdf

gewonnenen Standortdaten stützen kann. Beim Layout sollte berücksichtigt werden, inwieweit der Park systemdienliches Verhalten zeigen kann. Der bisher im Fokus stehende Energieertrag wird damit um weitere Aspekte ergänzt. Hierfür können Testfelder on- und offshore wichtige Beiträge liefern.

Da zukünftig immer mehr Windenergieanlagen vor dem Rückbau stehen und die Materialvolumina, die in die Windenergie fließen, kontinuierlich hoch sind, müssen auch Fragen des Rückbaus und der Wiederverwendbarkeit geklärt werden. Idealerweise sind die Werkstoffe für künftige Anlagengenerationen bereits so ausgewählt, dass diese leicht und hochwertig wiederverwendet werden können. Auf der Basis von Lebenszyklusanalysen kann das Optimum zwischen möglichst guter Wiederverwendbarkeit und robustem, zuverlässigem Anlagendesign kontinuierlich am Stand der Technik ausgerichtet werden.

Daneben sind auch weiterhin spezifische Neu- und Weiterentwicklungen aller Komponenten, vom Fundament bis zur Rotorspitze, notwendig. Unbestritten ermöglicht nur eine ganzheitliche Betrachtung eine erhöhte Zuverlässigkeit und damit auch eine Reduktion der Kosten des Gesamtsystems Windenergieanlage. Beispielhaft sind langlebige Umrichter, die auch netzdienliche Aufgaben übernehmen können, ebenso vonnöten wie Entwicklungen zur Senkung des leistungsspezifischen Gewichts im Antriebsstrang – beispielsweise durch den Einsatz neuer oder verbesserter Werkstoffe oder neuer Generator-/Getriebekonzepte. Hierdurch lässt sich die größenwachstumsbedingte Erhöhung der Gondelmasse dämpfen, was durch geringeren Materialeinsatz zu einer Effizienzerhöhung führt.

Eine erhöhte Zuverlässigkeit und eine längere Lebensdauer lassen sich auch durch die Minimierung der auf die Windenergieanlage einwirkenden Lasten erreichen. Durch eine verbesserte Kenntnis des einströmenden Windes können einzelne Anlagen auf Veränderungen des Windfeldes besser reagieren. Denn durch die Wirbelschleppes hinter einer Windenergieanlage oder hinter einem Windpark können erhöhte Lasten entstehen oder Erträge gemindert sein. Daher müssen Windparks als System betrachtet werden, und folgerichtig sind die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Windenergieanlagen bzw. zwischen Windparks Gegenstand der Forschung.

Bereits am Rotor entscheidet sich, ob und wie effizient der Wind in elektrische Energie gewandelt werden kann. Deshalb soll diesem Bauteil auch künftig besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Beispielhaft sind hier Verfahren zur Industrialisierung der Fertigung oder zur Geräuschminderung im Betrieb der Windenergieanlage zu nennen. Dabei spielt die Geräuschminderung nicht nur eine besondere Rolle bei der Anlagengenehmigung, sondern auch bei der Akzeptanz bei Anwohnerinnen und Anwohnern. In diesem Kontext bleibt die Entwicklung kostengünstiger und zuverlässiger technischer Methoden für eine bedarfsgerechte Befeuern oder für einen vogel- und fledermausfreundlichen Betrieb im Fokus der Förderung.

In Sonderfällen, wie dem nicht verbundener Inselnetze, können Kleinwindenergieanlagen helfen, eine zuverlässige und bezahlbare dezentrale Stromerzeugung zu ermöglichen. Dabei besteht Entwicklungsbedarf für Kleinwindenergieanlagen, die mit vergleichsweise geringer sowie turbulenter und schwankender Anströmung arbeiten. Um ausreichend gute Standorte erschließen zu können, ist die Vereinbarkeit der Windenergie mit anderen Interessen und öffentlichen Belangen wie dem Umwelt-, Natur-, Artenschutz sowie den Belangen des Luftverkehrs besonders wichtig. In der Windindustrie liegt – verglichen mit anderen Industriezweigen – ein geringes Maß an Standardisierung von Komponenten und Methoden vor. Hierzu können eine stärkere Modularisierung und die Etablierung von Standards zur Kostensenkung in vielen Schritten der Wertschöpfungskette beitragen. Bei der Installation ist dies bereits weitgehend erfolgt. Dennoch können auch hier verbesserte Installationskonzepte weiter zur Kostensenkung beitragen.

Strukturen der FuE-Förderung

Da die Windenergie einen weiter steigenden Anteil an der Stromerzeugung – bei insgesamt voraussichtlich wachsendem Strombedarf – übernehmen soll, muss auch die Förderung auf hohem Niveau und mit geeigneten Strukturen und Inhalten fortgeführt werden. Dies wird durch die Zusammenarbeit und den Austausch der relevanten Akteure im *Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien – Wind* unterstützt. Die bisherige Form der Förderung und ihre Schwerpunktsetzung soll durch Impulse der Mitglie-

der ergänzt werden. Zukünftig sollen gezielte Kooperationen mit anderen Forschungsnetzwerken vor allem Querschnittsthemen adressieren, beispielsweise die Wechselwirkung zwischen Windenergie und Stromnetzen. Neue Formate der Zusammenarbeit für diese in der Vergangenheit wenig kooperierenden Disziplinen können die Weiterentwicklung des Forschungsbereichs entscheidend unterstützen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Forschung in Reallaboren durchzuführen, bei denen gemeinsame Ansätze auch außerhalb der bestehenden Regeln durchgeführt werden können.

Das insbesondere offshore zu erwartende weitere Größenwachstum der Windenergieanlagen bedarf entsprechender Fertigungsstätten und Hafenanlagen. Eine Verzahnung mit den strategischen Zielen für die maritime Wirtschaft ist hier angebracht. Dies betrifft beispielsweise vorhandene oder zu ertüchtigende Fertigungs- und Logistikeinrichtungen.

Als Querschnittsaufgabe bietet die Digitalisierung für nahezu alle Prozesse wie Fertigung, Bau, Betrieb oder Netzfürhrung große Potenziale zur Einsparung und effizienten Nutzung der eingesetzten Ressourcen. Diese Möglichkeiten können vorteilhaft durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit genutzt werden. Die bei etwa 30.000 Windenergieanlagen anfallenden Betriebsdaten lassen weitere Erkenntnisse erwarten.

Nicht zuletzt durch die starke Exportorientierung der in Deutschland ansässigen Anlagenhersteller und durch die mittlerweile globalen Lieferketten für Windenergieanlagen wird eine enge Zusammenarbeit mit Ländern innerhalb wie auch außerhalb der EU gepflegt. Nur so lassen sich länderübergreifende Herausforderungen wie der sichere Betrieb von Netzen mit hohen Windanteilen effizient angehen. Auch klima- und regionalspezifische Lösungen (z. B. „Cold Climate“, besondere Netzbedingungen) lassen sich so auch vor Ort entwickeln und prüfen. Deshalb soll die Mitwirkung in geeigneten Tasks der IEA fortgeführt und die Zusammenarbeit auf europäischer Ebene intensiviert werden. Die im SET-Plan Implementation Plan durch die Temporary Working Group „Offshore Wind“ erarbeiteten Inhalte lassen sich auch im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms mit dem *Berliner Modell* umsetzen. Sie umfassen unter anderem die Themengebiete Betrieb und Wartung, Industrialisierung, Lebenszyklusbetrachtung, ganzheitliche Optimierung und Validierung zugehöriger Modelle und Werkzeuge, windenergiespezifische Systemintegration, mechanisches sowie elektrisches Komponentendesign.

4.2.3 Bioenergie

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Biomasse wird bis 2050 in begrenztem Maße zur Energiebereitstellung beitragen, vor allem basierend auf der energetischen Nutzung von Abfall und Gülle, Gär- und Reststoffen. Da die Energieerzeugung bis spätestens 2050 nahezu vollständig dekarbonisiert erfolgen muss und infolge der Beanspruchung von Flächen für die Ernährung wird die Bedeutung des Klimaschutzbeitrages von Bioenergie aus Anbaumasse an Grenzen stoßen. Demgegenüber wird die Nutzung von Bioenergie aus Rest- und Abfallstoffen einen zunehmend wichtigen Beitrag zur sektorübergreifenden Energieversorgung leisten, sodass die nachhaltig vorhandenen Potenziale ausgeschöpft werden.

In den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Mobilität trägt die Bioenergie schon heute zur klimafreundlichen Energieversorgung bei. Rund zwei Drittel der erneuerbaren Energien in Deutschland stammen aus der Bioenergie. Der Bedarf an hochenergetischen Energiequellen in der Industrie eröffnet der Bioenergie ein Anwendungsfeld für die Substitution fossiler Energieträger. Sie bildet auch eine eigene Wirtschaftsbranche aus. Zudem erschließt die Bioenergie der Land- und Forstwirtschaft zusätzliche Tätigkeitsfelder und Erwerbsquellen und trägt dadurch zur Stärkung der ländlichen Räume bei. Die energetische Verwertung von biogenen Ressourcen soll möglichst erst am Ende einer Nutzungskaskade stehen.

Auf Basis dieser Rahmenbedingungen lassen sich folgende Ziele für die Forschungsförderung ableiten: So kann die Bioenergie eine flexible Strombereitstellung oder -speicherung unterstützen, Systemdienstleistungen anbieten und einen Beitrag zur Stromnetzstabilität beisteuern. Im künftigen Gesamtenergiesystem soll sie den Ausbau der Sektorkopplung unterstützen und ihre Stärken im Verkehrssektor sowie als Bio-Wärme im Wärmemarkt ausspielen.

In vermehrtem Maß sollen auf der Basis von Rest- und Abfallstoffen kostengünstige, effiziente, klimafreundliche und nachhaltige Bioenergie-technologien und Verfahrenskonzepte zur Erzeugung von Strom, Wärme sowie Strom und Wärme in Kopplung, aber auch Biokraftstoffe erprobt und validiert werden. Lebenszyklusanalysen für bestehende oder in der Entwicklung befindliche Technologien und Nutzungskonzepte sind ein wichtiger Fokus der Forschung, um die Beiträge der Bioenergienutzung zum Klimaschutz

quantifizieren zu können. In diesem Kontext stellt sich die Frage, wie und für welche Anwendungen begrenzt verfügbare biogene Energieträger optimal eingesetzt werden können. Soweit möglich, muss eine Kaskaden- und Koppelnutzung das Ziel sein.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Ein wichtiges Ziel ist die Verbesserung der Systemdienlichkeit und der Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen zur biochemischen und thermo-chemischen Konversion von Biomasse durch Maßnahmen zur Effizienzsteigerung und Flexibilisierung. Hierzu gilt es, Anlagenkomponenten weiterzuentwickeln und die Gesamtwirkungsgrade beispielsweise durch gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung zu erhöhen. Weitere strategische Aufgaben zielen auf neue Geschäftsmodelle und die Entwicklung hin zu einer zirkulären Wirtschaft einschließlich der effizienten Verwertung kostengünstiger biogener Rest- und Abfallstoffe.

Für die Integration der Bioenergie in das Gesamtenergiesystem werden Forschungsaktivitäten zur systemdienlichen Flexibilisierung der Bioenergieanlagen bei gleichzeitig hoher Gesamteffizienz angestoßen. Dafür stehen neben dem Repowering von Anlagen auch die Neu- und Weiterentwicklung tragfähiger Geschäftsmodelle und Systemdienstleistungen sowie die Realisierung intelligenter Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik für die Verknüpfung mit anderen fluktuierenden und speicherbaren Energien im Fokus – beispielsweise durch Hybrid- und Multibridsysteme. Übergreifend sind kostengünstige, effiziente Lösungsansätze zur deutlichen Emissionsminderung bei der nachhaltigen Bioenergiebereitstellung zu entwickeln.

Die vielfältigen Eigenschaften von Biomasse als entweder gasförmiger, flüssiger oder fester, in jedem Fall aber speicherbarer und transportfähiger Energieträger müssen bei der Sektorkopplung genutzt und weiter ausgeschöpft werden. Aufgrund biologischer Prozesse im Pflanzenbau ist eine Minderung auf null Emissionen bei der Erzeugung von Anbaubiomasse kaum möglich. Demgegenüber wird die weitgehend emissionsarme Nutzung von Bioenergie aus Rest- und Abfallstoffen zunehmend an Bedeutung gewinnen und dadurch einen wichtigen Beitrag zur sektorübergreifenden Energieversorgung leisten. Vor diesem Hintergrund ist die Entwicklung flexibler und effizienter Bioenergieanlagen zur nachhaltigen Energiebereitstellung für Strom, Wärme und Mobilität dort voranzutreiben –

unter Berücksichtigung der Systemintegration solcher Anlagen und deren Potenzials für die Sektorkopplung. Beispiele dafür sind biomassebasierte KWK-Lösungen, das Zusammenspiel von Biomasse und erneuerbarem Strom in Power-to-X-Anwendungen und die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme oder -kälte im Industriesektor. Daneben hat die Förderung von Technologien und Systemen zur Bioenergiegewinnung und -nutzung für die weitere Reduzierung der Treibhausgasemissionen einen großen Stellenwert.

Biokraftstoffe leisten mittelfristig einen wichtigen Beitrag für das Erreichen der Klimaziele im Verkehrsbereich. Neue Antriebskonzepte, wie Elektromobilität mittels Batterie oder Brennstoffzelle, stehen in Straßenverkehr, in Schifffahrt und Luftverkehr auch in den kommenden Jahren noch nicht flächendeckend zur Verfügung. Um den Einsatz flüssiger und gasförmiger Biokraftstoffe weiter zu verbessern, werden verschiedene Forschungsaktivitäten gefördert. So sollen die Ausdehnung der Bandbreite und die Erschließung zusätzlicher biogener Rest- und Abfallstoffe bei hoher Kraftstoffqualität näher untersucht werden. Dazu müssen die vorrangigen Einsatzbereiche in spezifischen Verkehrssektoren identifiziert, die Produktionsverfahren und Anlagenkomponenten hinsichtlich Energie-, Kosten- und Klimaeffizienz verbessert und ihr Zusammenspiel beispielsweise in Bioraffineriekonzepten betrachtet werden.

Mit Blick auf den anzustrebenden klimaneutralen Gebäudebestand werden smarte Versorgungslösungen und effizientere Verbrennungstechniken eine steigende Bedeutung erfahren. So sind energetische, emissionsarme und wirtschaftliche Optimierungen kompakter Kleinstfeuerungen und brennstoffflexible Feuerungen mit biogenen Brennstoffen zur Wärmeversorgung von Niedrigenergie- und Passivhäusern sowie von Quartieren zu entwickeln. Neuartige Ansätze für Hybrid- und Multibridsysteme und erneuerbare Wärme- und Speicheroptionen in Kombination mit Bioenergie sind umzusetzen (siehe Kapitel 4.1.1).

Für eine integrierte Bioenergie sind standardisierte und sichere Informations-, Kommunikations- und Steuerungsschnittstellen zwischen den Bioenergieanlagen und weiteren Energieerzeugungsanlagen so zu entwickeln, dass die zeitlichen, räumlichen und wirtschaftlichen Bedarfe des Energieversorgungssystems bedient werden.

Querschnittsaspekte wie die Weiterentwicklung und Anwendung geeigneter Messverfahren und Methoden,

sektorgekoppelte Energiesystemmodelle, Langzeitstrategien, Nachhaltigkeitsanalysen sowie Lebenszyklusanalysen oder die Normierung und Standardisierung von Brenn- und Kraftstoffen werden ebenfalls gefördert.

Strukturen der FuE-Förderung

Neben Forschungs- und Entwicklungsvorhaben stehen vor allem Verfahrens- und Prozessoptimierungen mit Demonstrations- und Pilotcharakter und einer hohen KMU-Teilnahme im Fokus, um die Lücke zwischen Forschung und Markt zu schließen.

Die Bundesregierung setzt im Rahmen des Förderprogramms *Nachwachsende Rohstoffe* verschiedene Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben zur energetischen Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen um. Mit dem Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) hat das BMEL ein ressortübergreifendes Forschungsinstitut eingerichtet. Es entwickelt technische Lösungen und Konzepte zur ökonomisch tragfähigen, ökologisch unbedenklichen und sozial verträglichen Nutzung und Integration von Biomasse. Auch die Begleitforschung in der energetischen Biomassenutzung wird derzeit durch das DBFZ realisiert. Weitere Informationen sind unter energetische-biomassenutzung.de zu finden. Das *Forschungsnetzwerk Bioenergie* bündelt den Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik und erarbeitet Handlungsempfehlungen zu Strommarkt, Wärmemarkt und Verkehr.

Die Bioenergieförderung schließt an den *Strategischen Energie-Technologie-Plan* (SET-Plan) und den Implementierungsplan („Action 8“) Bioenergie und *Erneuerbare Kraftstoffe für einen nachhaltigen Transport* an. Dabei fördert sie komplementär zu den strategischen Zielen der EU im Bereich Forschung und Innovation den Ausbau der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt sowie im Transportsektor. Angestrebt werden Fortschritte bei der Effizienz, eine Kostenreduktion und ökologische Nachhaltigkeit. Sie ergänzt die Forschungsförderung der Europäischen Kommission in den Themenfeldern der Bioenergie im Programm „*Horizon 2020*“ und im Nachfolgeprogramm „*Horizon Europe 2021 – 2027*“. Auf nationaler Ebene wird die Bioenergieforschung unter anderem durch die Nachhaltigkeitsstrategie, den Biomasseaktionsplan, die Forschungsstrategie bzw. Politikstrategie Bioökonomie, die Charta für Holz sowie die Waldstrategie beeinflusst.

4.2.4 Geothermie

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Für die Nutzung des natürlichen Wärmeflusses der Erde zur Strom- und Wärmegewinnung kommen je nach Tiefe, Geologie und Anwendungszweck verschiedene Technologien zum Einsatz. Zur ausschließlichen Wärmenutzung werden im Gebäudebereich erdgekoppelte Wärmepumpensysteme eingesetzt. Auf der Quartiersebene werden Bohrungen in den Untergrund mit Wärmetauschern oder Wärmepumpen und Verteilernetzen kombiniert. Für die geothermische Stromgewinnung und großräumige Wärmeversorgung sind in Deutschland Tiefbohrungen notwendig, um ausreichend hohe Temperaturen und Wärmeflüsse für den Betrieb von Kraft- und Heizwerken zu erreichen.

Unterstützt durch die Forschungsförderung konnten zahlreiche geothermiespezifische technische Probleme in Exploration, Betrieb von Geothermie-Kraftwerken (siehe auch Kapitel 4.2.6) und geothermischer Wärmeversorgung gelöst werden. So wurden bereits rund 40 Megawatt Stromleistung installiert und die Wärmenutzung ausgebaut. Im Vergleich zur Stromerzeugung konnte die geothermische Wärmenutzung bereits die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zur konventionellen Wärmeerzeugung nachweisen. Die Geothermie kann somit künftig fossile Brennstoffe substituieren und einen wichtigen Beitrag zur Energiewende und CO₂-Emissionsminderung leisten.

Da mehr als 50 Prozent der Primärenergie in Deutschland für die Wärmeerzeugung verbraucht wird, ist der Ausbau der geothermischen Wärme- und Kältebereitstellung ein wesentliches strategisches Ziel für eine zukünftige Energieversorgung mit erneuerbaren Energien und hoher Energieeffizienz. Die zunehmende Nutzung der Geothermie als lokale Energiequelle erhöht zudem die Unabhängigkeit von Brennstoffimporten und fördert die heimische Wertschöpfung.

Für eine breite Marktdurchdringung gilt es, die mit der Nutzung der Geothermie verbundenen Risiken zu minimieren und die öffentliche Akzeptanz durch transparente, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basierende Kommunikation der Chancen und Risiken zu erhöhen. Zudem sollen die Energiegestehungskosten reduziert und geothermische Speicheranwendungen ausgeweitet werden.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Folgende Themen stehen im Fokus der FuE-Förderung:

- Demonstrationsvorhaben, die innovative technologische Lösungen mit hoher Übertragbarkeit umsetzen
- Weiterentwicklung der Technologie unter den Aspekten der Kostensenkung, Effizienzsteigerung, Anlagenverfügbarkeit, Automatisierung und Digitalisierung der Geothermie im Strom- und Wärmebereich
- Weiterentwicklung der Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund
- Ausbau der geologischen Datenbasis zu geothermischen Nutzungsmöglichkeiten
- Sicherheitsaspekte von Verfahren und Nutzungskonzepten
- Forschung zur stofflichen Nutzung geförderter geothermischer Fluide
- Modellierung und Simulation geothermischer Systeme zur Erhöhung der Prognosesicherheit und finanziellen Risikominimierung

Strukturen der FuE-Förderung

Neben Forschungseinrichtungen und Unternehmen sollen vor allem auch Anwender wie Energieversorger und Stadtwerke gefördert werden. Anwendungsorientierte Forschungsthemen sollen dabei gezielt durch Demonstrationsvorhaben flankiert werden. Ein Wissensaustausch der Akteure findet in den *Forschungsnetzwerken Energie* statt, wegen des starken Bezugs zur Wärmeversorgung insbesondere im *Forschungsnetzwerk ENERGIEWENDEBAUEN*. Die Einbindung von Anwendern soll zukünftig noch sichtbarer werden. Denn sie können den Ergebnistransfer in die breite Anwendung besonders befördern und wichtiges Feedback an die Forscher geben.

Die Bundesregierung unterstützt auch internationale FuE-Kooperationen, etwa durch Aktivitäten im Rahmen der IEA sowie durch die Umsetzung des SET-Plans sowie durch die Beteiligung an transnationalen Förderinstrumenten wie ERA-Nets. Auf europäischer Ebene liegen die

Schwerpunkte auf dem durch die SET-Plan Temporary Working Group „Deep Geothermal“ definierten Implementierungsplan, der mittels nationaler und europäischer Förderung sowie durch industrielle Investitionen umgesetzt werden soll.

Die Forschung und Entwicklung zur Geothermie weist starke Verbindungen zum Forschungsbereich Gebäude und Quartiere auf, insbesondere zu den Themen saisonale thermische Speicher (z. B. Aquifer-Speicher), Wärmepumpenanwendungen, LowEx-Systeme und Sektorkopplung (siehe Kapitel 4.1.1 und 4.3.3). Während dort der systemische Kontext im Vordergrund steht, zielt der Forschungsbereich Geothermie vornehmlich auf die technologische Entwicklung ab. Anknüpfungspunkte bestehen zudem mit dem Forschungsbereich thermische Kraftwerke (siehe Kapitel 4.2.6).

4.2.5 Wasserkraft und Meeresenergie

Wasserkraft ist als Energiequelle bewährt, die Anlagentechnik weitgehend ausgereift. Während technische Neuerungen und die Modernisierung von Bestandsanlagen den Wirkungsgrad verbessern, trägt die Forschungsförderung in der Wasserkraftnutzung besonders steigenden ökologischen Anforderungen Rechnung und dient der umweltverträglichen Gestaltung von Wasserkraftanlagen.

Die Nutzung der Meeresenergie ist weltweit noch im Demonstrationsstadium. Der Tidenhub und der Energiegehalt in Strömung und Wellen sowie Thermal- oder Salzgradienten können für die elektrische Energiegewinnung genutzt werden. Aufgrund der geografischen Bedingungen ist die Energiegewinnung an deutschen Küsten wirtschaftlich nicht vielversprechend. Für heimische Unternehmen besteht jedoch die Chance, Exportmärkte in Regionen mit besseren Bedingungen, z. B. einem relativ konstanten, starken Strömungsmuster und Wellenklima, zu erschließen – wie etwa in Großbritannien oder Frankreich. Einen besonderen Schwerpunkt bildet dabei die Entwicklung und Demonstration wirtschaftlich vielversprechender und unter maritimen Bedingungen besonders widerstandsfähiger Aggregate zur nachhaltigen Nutzung von Strömungs- und Wellenenergie. Die Bundesregierung fördert daher in angemessenem Umfang neben innovativen Komponenten für Laufwassersysteme die Entwicklung und Demonstration von Meeresströmungsturbinen und Wellenenergiekonvertern.

4.2.6 Thermische Kraftwerke

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Die Stromerzeugungsinfrastruktur in Deutschland besteht bis heute überwiegend aus thermischen Kraftwerken. Dies sind Kraftwerke, in denen Wärme aus verschiedenen Energiequellen durch Gas- und Dampfkreisprozesse in Strom umgewandelt wird: bislang zumeist Kohle, Erdgas und Kernenergie. Zukünftig wird dies verstärkt durch Abfälle, Biomasse, Erdwärme und Wärme aus anderweitig nicht nutzbarem erneuerbaren Strom geschehen. Diese Kraftwerke zeichnen sich im Allgemeinen durch eine lange Lebensdauer aus und sind ein wichtiger Teil der Energieinfrastruktur. Wie bestehende Energieinfrastrukturen, zu denen auch die mit Blick auf zentrale Großkraftwerke ausgebauten Stromnetze gehören, durch neue technologische Lösungen für die Energiewende nutzbar gemacht werden können, ist daher eine drängende Forschungsfrage. Eine Möglichkeit könnte die Nutzung bestehender Standorte für große und effiziente Stromspeicher sein. Diese werden bei steigenden Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien im Energiesystem verstärkt benötigt. So könnten bestehende Kraftwerke auch in Zukunft zu einer stabilen Energieversorgung beitragen. Strukturbrüche lassen sich auf diese Weise verhindern oder zumindest mildern. Dazu sind jedoch umfangreiche Forschungsarbeiten zu Technologien und Konzepten für eine klima- und umweltverträgliche Nutzung bestehender Strukturen notwendig. Große thermische Energiespeicher, Hochtemperatur-Wärmepumpen und innovative Prozesstechnik sind hierfür zentrale Forschungsthemen, die auch für bestehende und neue Wärmeversorgungsinfrastrukturen einen wichtigen Beitrag leisten können.

Gaskraftwerke haben ein hohes Flexibilitätspotenzial und können dazu beitragen, die fluktuierende Erzeugung aus erneuerbaren Energieanlagen auszugleichen. Im Zuge der Sektorkopplung werden dem Gasnetz neue Aufgaben zufallen, beispielsweise durch steigende Anteile von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien (siehe Kapitel 4.3.3). Insbesondere für Gaskraftwerke sind Brennstoff- und Lastflexibilität daher wichtige Forschungsziele, um Systemdienstleistungen erbringen zu können.

Solarthermische Kraftwerke nutzen konzentrierte Sonnenenergie als Wärmequelle. Sie existieren in Deutschland wegen der geringen direkten Sonneneinstrahlung nur als

Demonstrationsanlagen. Klimaschutz und der zugehörige Umbau der Energieversorgung sind aber globale Herausforderungen. In anderen Regionen der Welt spielt die solarthermische Nutzung der Sonneneinstrahlung eine wichtige Rolle. Deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen sind auf dem Gebiet der solarthermischen Stromerzeugung in vielen Bereichen weltweit führend. Damit verfügt Deutschland in diesem Bereich über ein hohes Exportpotenzial.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Neue Kraftwerksprozesse

Unter Berücksichtigung der strategischen Ziele gehören zu den wichtigen FuE-Themen in diesem Bereich:

- die Anpassung von Kraftwerksprozessen zur langfristigen Nutzbarmachung der Energieinfrastruktur, beispielsweise durch die Entwicklung neuartiger Kreisprozesse oder hybrider Anlagenkonzepte
- die Integration von Energiespeichern in den Kraftwerksprozess, z. B. Hochtemperaturwärmespeicher, Strom-Wärme- und Strom-Wärme-Strom-Speicher oder isentrope Speicher, bei denen erneuerbarer Strom reversibel in Wärme und gegebenenfalls in mechanische Energie (z. B. Rotation) umgewandelt wird
- die Entwicklung und die Integration geeigneter Hochtemperaturwärmepumpen
- Retrofitmaßnahmen zur Integration veränderter oder neuer Brennstoffzusammensetzungen, z. B. die Mit- oder Alternativnutzung von Wasserstoff, Abfall- und biogenen Reststoffen, die Integration thermischer Speicher, Maßnahmen zur Erhöhung des Wirkungsgrads unterschiedlicher Betriebsarten und die Minderung von Emissionen
- Einsatz neuer Brennstoffe und Verfahrensprozesse, beispielsweise reiner Wasserstoff und superkritisches CO₂
- Übertragbare technologische Prozesse und Betriebsführungskonzepte, kraftwerksinterne Infrastruktur und Konzepte zur Abtrennung und Nutzung von CO₂ im Kontext der Verbrennung von Abfall- und biogenen Reststoffen, inklusive Werkstoffentwicklung und

-weiterentwicklung (z. B. CO₂-Rohrleitungen, CO₂-Verdichter, CO₂-Abscheideverfahren)

- die Kombination verschiedener Prozess-, Speicher- und Infrastrukturentwicklungen

Turbomaschinen

Da gegenwärtig Strom nicht direkt in ausreichendem Maße gespeichert werden kann, wird diskutiert, den bei der Integration volatiler erneuerbarer Energien anfallenden, nicht direkt nutzbaren Strom für so genannte Power-to-X-Prozesse überwiegend zur Wasserstoff- und Brennstoffherzeugung einzusetzen. Die Flexibilisierung der Gaskraftwerke steht daher im Fokus der Forschungsförderung. Dabei geht es um die Veränderung der Gaszusammensetzung hin zu höheren Wasserstoffgehalten sowie um den Einsatz gasförmiger synthetischer Brennstoffe aus Power-to-X-Anlagen zur Rückverstromung.

Hinsichtlich der Brennstoff- und Lastflexibilität ergeben sich folgende FuE-Themen:

- Optimierung der Prozesse und Systeme sowie der Lebensdauer der Gesamtanlage und ihrer Komponenten einschließlich thermodynamischer und aerodynamischer Optimierungen (Erhöhung der Betriebstemperaturen, Optimierung von Kühlsystemen)
- Verbesserung der Wärmeübertragung (Rekuperation) und der Verbrennungssysteme (Brenner und Brennkammer) sowie Optimierung hinsichtlich Zündung und Flammenstabilität
- Material- und Werkstoffforschung sowie Wartungs-, Reparatur- und Ersatzmaßnahmen zur Erfüllung veränderter Betriebszyklen, einschließlich Korrosionsuntersuchungen auf Grund veränderter Brennstoffzusammensetzungen, Composite- und Keramik-Materialien sowie hochtemperaturresistente Materialien für die Turbinen
- Retrofit-Maßnahmen zur Ertüchtigung bestehender Anlagen hinsichtlich ihrer Brennstoff- und Betriebsflexibilität, inkl. CCU

Allgemein wird die Entwicklung dezentraler, modularer Kraftwerksanlagen mittlerer Leistungsklasse vorangetrieben. Als Alternative rücken auch Gasmotoren wieder stär-

ker in den Fokus. Darüber hinaus spielen die Vernetzung dezentraler Kraftwerke, Gasmotoren mit erneuerbaren Erzeugungsanlagen und Energiespeichern (virtuelles Kraftwerk) eine Rolle. Die Modellierung und Simulation von Systemen, Anlagen und Komponenten (Digital Twin) sowie Sensorik, Datenanalyse und lernende Verfahren zur Steuerung und Betriebsoptimierung können ebenfalls zur Erhöhung der Last- und Brennstoffflexibilität beitragen.

Solarthermische Kraftwerke

Um die Exportchancen im Bereich der solarthermischen Kraftwerkstechnologie zu nutzen, müssen Integrationskonzepte für solarthermische Kraftwerke und Wärmespeicher im Verbund mit anderen erneuerbaren Energiequellen entwickelt werden. Das Ziel ist eine planbare, bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme. Damit muss eine weitere Kostensenkung einhergehen.

Aus diesen allgemeinen Zielen ergeben sich wichtige FuE-Themen wie die

- Entwicklung technologieübergreifender Konzepte und Pilotprojekte sowie eine kostenoptimierte Konzeptionierung verbrauchsorientierter Energiebereitstellung, z. B. in Kombination mit Photovoltaik, Wind, Biomasse und Biogas;
- Weiterentwicklung solarthermischer Kraftwerke mit hohem Wirkungsgrad bei hoher Flexibilität;
- Bereitstellung von Mittel- und Hochtemperaturwärme für solare Kühlung, Nah- und Fernwärme sowie industrielle Prozesse – auch mit dem Potenzial zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe über thermochemische Verfahren (siehe Kapitel 4.1.3);
- techno-ökonomische Effizienzsteigerung: Dazu zählen die ganzheitliche Systemoptimierung und Betrachtung aller Kernkomponenten (Solarfeld, Receiver, Speicher, Kraftwerksblock etc.) einschließlich Steuerung, Betrieb und Wartung sowie die Nutzung innovativer digitaler Technologien hinsichtlich Kostenminimierung, Effizienzsteigerung und Zuverlässigkeit (CSP 4.0);
- standardisierte Entwicklung von Mess- und Prüfverfahren zur Erfassung der Leistungsfähigkeit und Lebensdauer aller Systeme und Komponenten.

Geothermische Kraftwerke

Neben der direkten Nutzung geothermischer Wärme bietet die tiefe Geothermie die Möglichkeit zur Wärmebereitstellung und Stromproduktion. Bedingt durch die Temperaturen der geförderten Fluide von bis zu 180 °C kommen in Deutschland bisher ausschließlich Kraftwerke mit Sekundärkreislauf wie ORC- (Organic Rankine Cycle) und Kalina-Kreisprozess-Anlagen zum Einsatz.

Forschungsbedarf besteht z. B. hinsichtlich des Einsatzes verbesserter Wärmeübertragungsanlagen, deren Komponenten und Medien sowie zu verbesserten Kühlprozessen zwecks Steigerung des Wirkungsgrads und der damit verbundenen erhöhten Wirtschaftlichkeit. Wegen der erhöht auftretenden Korrosion im Kreislauf der geförderten geothermischen Fluide besteht darüber hinaus zusätzlicher Bedarf an Materialforschung.

Strukturen der FuE-Förderung

Auf nationaler Ebene bündeln sich Themen und Akteure des Forschungsbereichs Thermische Kraftwerke im *Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung*. Ein themenspezifischer Austausch der Mitglieder findet im Rahmen verschiedener Arbeitsgruppen statt. Er setzt zukünftig noch stärker auf den anwendungsbezogenen Ergebnistransfer und die Bearbeitung von Querschnittsthemen in Kooperation mit Arbeitsgruppen weiterer Netzwerke.

Die Bundesregierung beteiligt sich auch an internationalen FuE-Aktivitäten auf diesem Gebiet. Für die Aktivitäten des SET-Implementierungsplans zu solarthermischen Kraftwerken wurde die Mitwirkung an den Themenbereichen *Verbesserung der Salzschnmelzentechnologie in Zentral-Receivern* („Improved Central Receiver Molten Salt Technology“), *Parabolrinnenreceiver mit Salzschnmelzen* („Parabolic Trough with Molten Salt“) und *Parabolrinnenreceiver mit Silikonölen* („Parabolic Trough with Silicon Oil“) zugesagt. Darüber hinaus findet eine aktive Mitarbeit im Rahmen des Solar-ERA-Net zu allen Themen der solarthermischen Kraftwerkstechnik („Topic E – CSP low cost and next generation technologies“) sowie in IEA-Arbeitsgruppen des Technology Collaboration Programme (TCP), beispielsweise SolarPACES („Solar Power and Chemical Energy Systems“), statt.



4.3 Systemintegration: Netze, Speicher, Sektorkopplung

4.3.1 Stromnetze

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

In der Umsetzung der zentralen politischen Ziele für das deutsche Energiesystem besteht eine wesentliche Aufgabe in der besseren Auslastung, Modernisierung und dem Aus- und Umbau der Stromnetze, um die Potenziale der erneuerbaren Energien, auch über Sektorgrenzen hinweg, volkswirtschaftlich nutzen zu können. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien kann einerseits der Abstand zwischen Erzeugungs- und Verbrauchszentren weiter wachsen (z. B. bei Offshore-Windparks). Damit bleibt die Energieübertragung über große Entfernungen von Bedeutung. Andererseits wird es aber vermehrt zu dezentralen Versorgungsstrukturen kommen. Daneben setzen sich die Trends der zunehmenden Elektrifizierung von Mobilität und Wärmebereitstellung weiter fort. Dies erfordert einen zunehmend abgestimmten Betrieb zwischen regionalen und überregionalen Stromnetzbetreibern, Erzeugungsanlagen und Verbrauchern, um die Flexibilisierung des Energiesystems voranzutreiben. Mit Hilfe von Forschung und Entwicklung schreitet die Integration und Transformation der Stromnetze zu einem technologieoffenen und marktorientierten System voran.

Beim Aus- und Umbau der Stromnetze ist eine hohe Versorgungssicherheit bei gleichbleibend guter Versorgungsqualität eine der Grundlagen für die internationale Wettbewerbsfähigkeit des Industrie- und Wirtschaftsstandorts Deutschland. Gleichzeitig soll der Übergang zu einer energieeffizienten und umweltschonenden Energieversorgung erreicht werden. Die Digitalisierung ist dabei sowohl Chance als auch Herausforderung. Das Ziel sind resiliente Stromnetze als zentrale Komponente eines sicheren Energiesystems.

Damit die Stromnetze auch in Zukunft diesen vielfältigen Anforderungen gerecht werden, sind Forschung und Entwicklung essenziell. Durch steigende Komplexität und zunehmende wechselseitige Abhängigkeiten im Gesamtsystem müssen hierbei verstärkt die Ergebnisse aus anderen Forschungsbereichen berücksichtigt werden.

Ein Grundpfeiler der Forschungsförderung ist dabei der Einsatz moderner Betriebsmittel sowie deren Weiterentwicklung, um sowohl Auslastung und Belastbarkeit als auch Stabilität und Sicherheit zu verbessern. Neue Materialien und Betriebsmittel ermöglichen kompakte, kosteneffiziente, langlebige und umweltverträgliche Technologien in den Netzen einzusetzen. Diese Technologien unterstützen die Integration von Strom-, Gas- und Wärmenetzen, das

Zusammenspiel von AC- und DC-Netzen sowie neue Formen der Versorgung.

Darüber hinaus sind Verfahren und Technologien für einen flexiblen, sicheren und effizienten Netzbetrieb weiterzuentwickeln. So können innovative Methoden und Werkzeuge des Netzbetriebs sowie der Netzplanung die Integration neuer Netzbetriebsmittel, neue Formen der Energieinfrastruktur und die Sektorkopplung ermöglichen oder erleichtern. Dabei stehen Netzregelung und Netzschutz, Netzstabilität und Systemsicherheit sowie Systemintegration der erneuerbaren Energien im Fokus.

Maßgeschneiderte Stromnetze für integrierte regionale Energiesysteme sind für die effiziente Nutzung lokaler wie globaler Ressourcen erforderlich. Gleichzeitig ist deren Einbettung in überregionale Netzstrukturen zu beachten. So lassen sich die Konzepte für eine nachhaltige lokale und regionale Versorgung durch erneuerbare Energien großflächig skalieren und gleichzeitig Sicherheit sowie Stabilität der Versorgung garantieren.

Auch die digitale Transformation des Stromnetzes zum smarten Energiesystem (Smart Grids) soll durch Forschung und Entwicklung weiter unterstützt und vorangebracht werden. Systemisch sichere Lösungen zur Durchdringung des Stromnetzes mit Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) werden es ermöglichen, auf vielfältige Optionen bei Planung und Betrieb zurückgreifen zu können, Kosten für Betrieb und Planung zu senken und die Ansätze skalierbar auf verschiedenen Spannungsebenen zu gestalten. Zudem können dadurch Sektorkopplung und die Integration erneuerbarer Energien erleichtert werden.

Das deutsche Stromnetz ist stark in den europäischen Verbund integriert, sodass die durch Forschung entwickelten Lösungen helfen, durch koordiniertes Vorgehen das Erreichen der europäischen Klimaziele zu beschleunigen. Zudem stärken Forschung und Entwicklung die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen und Forschungseinrichtungen im internationalen Umfeld.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Der Forschungsbereich Stromnetze umfasst aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems ein sehr breites Themenspektrum. Folgende FuE-Felder sind im 7. Energieforschungsprogramm von besonderer Bedeutung:

Betriebsmittel und Komponenten

Zur Erhöhung von Aufnahme- und Transportkapazität des Stromnetzes werden bestehende Betriebsmittel weiterentwickelt und neue Betriebsmittel zur Verbesserung der Systemeigenschaften wie der Netzstabilität ausgearbeitet. Innovative Netzbetriebsmittel tragen zu einem sicheren und kostengünstigen Netzbetrieb bei und ermöglichen zugleich die Steigerung der Netzkapazität sowie die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Versorgung. Zukünftig sind Stromrichter bei dezentraler Energieerzeugung und bidirektionalen Lastflüssen ein wesentlicher Bestandteil der Netzinfrastruktur. Um die Netzdienlichkeit der Stromrichter zu gewährleisten, adressiert die Forschung Technologien zur Erhöhung der Verfügbarkeit und Effizienz sowie zur Reduzierung der Kosten von Komponenten und des Gesamtsystems. Auch der Einsatz neuer Materialien trägt zu verbesserten Netzbetriebsmitteln bei, um die Kosten zu senken und die Zuverlässigkeit zu erhöhen, beispielsweise für Erdkabel, gasisolierte Leitungen und Schaltanlagen, Freileitungen, neue Halbleitermaterialien für Netzkomponenten sowie den Einsatz der Supraleitertechnologie.

Netzbetrieb

Mit neuen Technologien im Netz lassen sich die Grenzen der bisherigen Netzbetriebsführung, Netzplanung und des Netzschutzes verschieben und erweitern. Allerdings müssen Schutz- und Leittechnik in zukünftigen dezentralen Versorgungsstrukturen jederzeit einen sicheren Netzzustand gewährleisten, Fehlersituationen zuverlässig erkennen und beherrschen. Dazu bedarf es der Erforschung neuartiger Verfahren und Komponenten, um die heute geltenden Anforderungen an Selektivität, Zuverlässigkeit und Schnelligkeit weiterhin zu erfüllen. Zudem sind Verfahren zum Notfallbetrieb und Systemwiederaufbau unter Einbeziehung verteilter Erzeuger auf unterschiedlichen Spannungsebenen notwendig. Dies erfordert neben neuen, universellen Schalt-, Schutz- und Sicherheitskonzepten auch Anpassungen der Netzleittechnik und einen koordinierten Netzschutz sowie Wiederanfahrstrategien für die Stromnetze.

Dabei gilt es, die Kriterien für Sicherheit und Systemstabilität vor dem Hintergrund bisheriger und zukünftiger Veränderungen im Energieversorgungssystem zu überprüfen. Mögliche Instabilitäten sind zu erforschen und die Analyse- und Simulationswerkzeuge so anzupassen, dass sie

der Komplexität des Gesamtsystems gerecht werden. Diese Werkzeuge unterstützen Planung und Betrieb des Netzes zur Sicherstellung systemdienlicher Interaktionen, Resilienzerhöhung und Systemoptimierung.

Ein flexibler, sicherer und effizienter Netzbetrieb muss zukünftig alle Erzeuger und Verbraucher über unterschiedliche Spannungsebenen und Sektorgrenzen hinweg berücksichtigen. Dazu sind für die Bereitstellung von Flexibilität und deren Steuerung neuartige, optimierte Betriebsführungskonzepte und Betriebsmittel für alle Netzebenen erforderlich. Von besonderer Bedeutung ist die Ertüchtigung der volatilen erneuerbaren Erzeuger hin zu systemstabilisierendem Verhalten. Denn mit Wegfall regelbarer konventioneller Kraftwerke entfällt auch deren stabilisierende Wirkung auf das Stromnetz. Die Forschung orientiert sich an zukünftigen Nutzungsfällen, wie z. B. der Durchdringung des Stromnetzes mit Elektromobilität, Inselnetzen mit hohem Anteil erneuerbarer Erzeuger oder der Untersuchung kollektiver dynamischer Phänomene. Die Erschließung von Flexibilität im Netz verlangt eine verbesserte Netzintegration sowie passende Managementkonzepte zur Erbringung von Systemdienstleistungen. Dies betrifft die Beobachtbarkeit, Bewertung und (automatisierte) Steuerbarkeit des Gesamtsystems, beispielsweise durch automatisierte Erfassung der Systemstruktur, dynamische und transiente Sicherheitsanalysen und vorausschauende Verfahren, die auf Last- und Erzeugungspromos basieren. Letztendlich muss für die Optimierung des Gesamtsystems auch eine Demonstration und Analyse des Einsatzes von Flexibilität aus dem Stromnetz in anderen Sektoren und Energienetzen erfolgen.

IKT im Stromnetz

Die informationstechnische Vernetzung im Stromnetz und mit dem Energiesystem erfolgt entlang aller Netzebenen und Energiesektoren. Drängende Fragen betreffen den automatisierten Umgang mit Netzteilnehmern wie auch Automatisierungslösungen für Betriebsführungsstrategien, Betriebsmittel und Netzausbauplanung. Daneben ist die IKT-basierte Verknüpfung technischer Operationen, betrieblicher Abläufe und geschäftlicher Transaktionen voranzutreiben. Wo im Zuge der voranschreitenden digitalen Transformation des Stromnetzes große Datenmengen entstehen, werden für deren Speicherung, Verarbeitung und Auswertung innovative Lösungsansätze benötigt. Sie sollen das zentrale Zusammenführen und langfristige Spei-

chern flächendeckend und kontinuierlich erfasster Informationen vermeiden.

Die Verknüpfung von Informations- und Energiesystem stellt erhöhte Ansprüche an die IKT-Sicherheit und die Resilienz. So hängt die Stabilität des Stromnetzes und damit des gesamten Energiesystems nicht mehr ausschließlich von dessen Betriebszuständen und Betriebsmitteln ab. Die IKT kommt als neues Betriebsmittel hinzu. Daher wird die IT-Sicherheit auch weiterhin bei Planung und Betrieb neuer Technologien eine zentrale Forschungsfrage sein (Security-by-Design). Bestehende Sicherheitsverfahren und -maßnahmen sowie sicherheitsrelevante Technologien sollen kontinuierlich an den Stand von Wissenschaft und Technik angepasst werden.

Netzplanung und neue Netzstrukturen

Durch den Einsatz von IKT, neuen Betriebsmitteln und flexibleren Betriebskonzepten kann das Energiesystem in neuen Strukturen gedacht werden. So finden verteilte, zellulare Ansätze, die Verknüpfung verschiedener Sektoren, die Vermaschung von AC- und DC-Netzen sowie Ebenen übergreifende Planungsmethoden in der Forschung Berücksichtigung. So soll beispielsweise die Integration von Gleichstromnetzen und der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik in bestehende Versorgungssysteme ermöglicht werden. Neue Technologien und Konzepte werden getestet, Prüfanforderungen angepasst und um adäquate Testverfahren (z. B. Hardware-in-the-loop) erweitert.

Strukturen der FuE-Förderung

Im *Forschungsnetzwerk Stromnetze* tauschen sich die Mitglieder zu einem breiten Themenspektrum aus, darunter die HGÜ, Systemstabilität, Digitalisierung und IKT, Anlagen- und Stromrichtertechnik und Flexibilisierung. In themenspezifischen Arbeitsgruppen entwickeln die Expertinnen und Experten Vorschläge zur strategischen Ausrichtung der Forschungsförderung in diesem Bereich und zu thematischen Schwerpunkten durch Beiträge zu Förderaufrufen, Förderbekanntmachungen oder Wettbewerben. Querschnittsthemen, die gemeinsam mit weiteren Netzwerken betrachtet werden müssen, gewinnen an Bedeutung.

Das Stromnetz stellt eine der zentralen Infrastrukturen des Energiesystems dar, dessen Bedeutung unter anderem durch die zunehmende Elektrifizierung noch steigen wird. Daher besitzen Forschung und Entwicklung im Bereich der Stromnetze und der Netzintegration erneuerbarer Energien viele Anknüpfungspunkte mit anderen Forschungsthemen, etwa zur Integration von Photovoltaik und Windenergie (siehe Kapitel 4.2). Zudem erfordert die sektorübergreifende Erschließung von Flexibilitätsoptionen gemeinsame Lösungen aus den Bereichen Energiespeicher, Wärmenetze und Gasnetze (siehe Kapitel 4.3.3). Die intelligente Kopplung zum Industriesektor ist nötig, um die dort vorhandenen Flexibilitätspotenziale zu aktivieren (siehe Kapitel 4.1.2). Auch Verknüpfungen mit dem Gebäudesektor sowie dem Wärmesektor führen zu mehr Flexibilität im deutschen Energiesystem und unterstützen ein netzdienliches Lastverhalten (siehe Kapitel 4.1.1). Aufgrund der zunehmenden Integration der Elektromobilität in die Stromnetze wird die Kopplung zum Verkehrssektor evident (siehe Kapitel 4.1.3). Nicht zuletzt hat die Forschung im Bereich Stromnetze, insbesondere zur Netzplanung und Netzbetriebsführung, oft systemischen Charakter und damit ausgeprägte Schnittstellen zu Forschungsfragen der Energiesystemanalyse (siehe Kapitel 4.4.1). Stromnetze spielen auch eine wichtige Rolle in systemisch angelegten großen Demonstrationsvorhaben. Eine ganzheitliche Herangehensweise und langfristige Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft hat sich in diesem Kontext bewährt (z. B. im Rahmen der *Kopernikus-Projekte* sowie des Förderprogramms *SINTEG*). Um innovative Geschäftsmodelle oder Betriebskonzepte erproben zu können, sind hierzu ggf. Anpassungen des regulatorischen Rahmens erforderlich (siehe Kapitel 3.1).

Diese enge Verknüpfung mit benachbarten Bereichen erfordert koordinierte, übergreifende Forschungsaktivitäten. Gemeinsame Förderaufrufe und Forschungsinitiativen werden künftig diese Verbindungen unterstreichen. Die Forschungsnetzwerke werden die bereichsübergreifende Forschung mit gemeinsamen Veranstaltungen, Workshops und Diskussionspapieren begleitend unterstützen.

Im Rahmen des SET-Plans wird die Koordination der europäischen Forschungsförderung im Bereich Stromnetze und Netzintegration erneuerbarer Energien in „Action 4“ des Implementierungsplans (Erhöhung der Resilienz und Sicherheit des Energiesystems) abgebildet. Diese Maßnahme fußt auf zwei Programmzielen: der Optimierung eines europäischen Stromnetzes sowie der Entwicklung

integrierter regionaler und lokaler Energiesysteme, in denen wiederum Stromnetze und die Integration erneuerbarer Erzeugung eine zentrale Rolle spielen. Zu beiden Zielen tragen die nationalen Förderprojekte im 7. Energieforschungsprogramm langfristig bei.

Weiterhin beteiligt sich Deutschland am Erreichen dieser Programmziele im Rahmen verschiedener Aktivitäten auf europäischer Ebene. Im Bereich der Projektförderung helfen Instrumente des europäischen Forschungsprogramms wie das ERA-Net *Smart Energy Systems*, die Förderung der europäischen Länder im Bereich intelligente Netze und Netzintegration erneuerbarer Energien unter Beachtung von Energiespeichern und systemanalytischen Aspekten effizient zu koordinieren. Flankierend werden Forschungsinitiativen mit der Förderung nach dem *Berliner Modell* gemeinsam mit anderen Ländern lanciert. Gerade im Bereich Stromnetze bietet sich dieses Modell für die effektive Abwicklung bi- und trilateraler Förderprojekte mit Partnern aus Nachbarstaaten Deutschlands an. Ergänzend zur direkten Forschungsförderung wird sich Deutschland auch am laufenden Wissensaustausch mit anderen europäischen Ländern beteiligen. Im Rahmen von Mission Innovation beteiligt sich Deutschland an der *Smart Grids Innovation Challenge*.

4.3.2 Stromspeicher

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

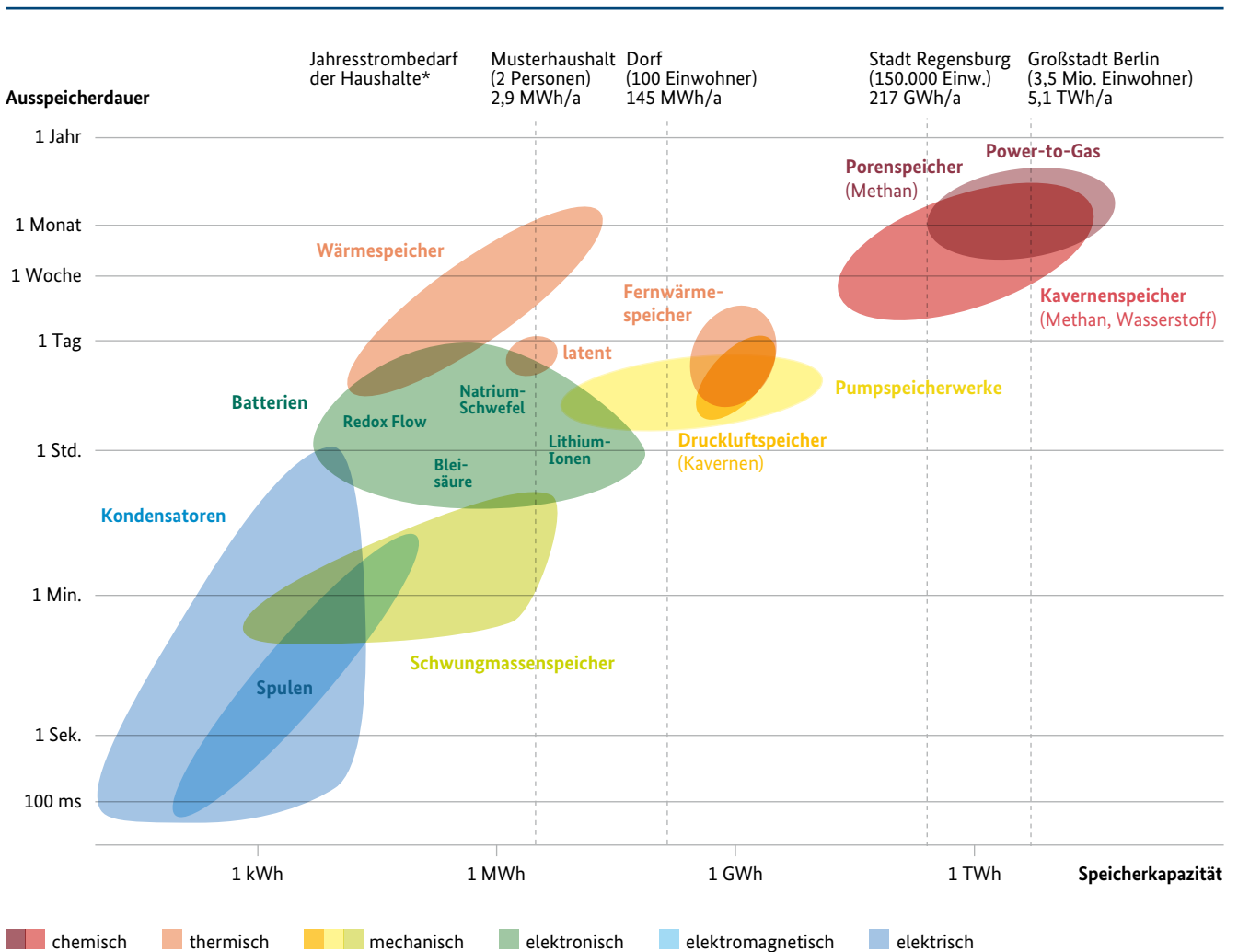
Stromspeicher sind ein wesentlicher Baustein zur Flexibilisierung des künftigen Energiesystems. Sie tragen zur Einbindung weiterer Anteile erneuerbarer Energien und zur Versorgungssicherheit bei, da sie schnell auf Fluktuationen reagieren und das Netz stabilisieren können. Die Einsatzgebiete für Stromspeicher sind breit. Im öffentlichen Stromnetz können sie Systemdienstleistungen erbringen, in Elektrofahrzeugen versorgen sie den Antriebsstrang allein oder in Verbindung mit einer Brennstoffzelle mit elektrischer Energie. In Gebäuden, Quartieren oder industriellen Anlagen tragen sie zur Erhöhung des Eigenverbrauchs und zum Energiemanagement bei. In Wind- und Solarparks können Speicher durch zeitliche Verschiebung der Stromeinspeisung die Wirtschaftlichkeit verbessern und die Erzeugung erneuerbarer Energie erhöhen, indem Abregelung vermieden wird. Diese und weitere Beispiele unterstützen die Sektorkopplung, die Integration erneuerbarer Energien

und die Effizienz des Energiesystems als Ganzes. Notwendig sind hierfür Stromspeicher mit spezifisch optimierten Eigenschaften (insbesondere Leistung, Kapazität, gravimetrische oder volumetrische Energiedichte, Zyklenfestigkeit, Reaktionszeiten und Kosten), die für die jeweiligen Anforderungen besonders geeignet sind und kurze, mittelfristige und langfristige Speicheraufgaben übernehmen können.

Ansatzpunkte für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit von Stromspeichern sind neben der reinen Kostendegression bei Speicherelementen und -systemen die Steigerung von Qualität und Sicherheit sowie eine zunehmende Standar-

disierung für die Verbreiterung der Kompatibilität. Digitalisierte, automatisierte Fertigungstechnologien sind weiterzuentwickeln, die Nachhaltigkeit ist zu verbessern. Innovative Stromspeicher und ihre Umgebung sind optimal an konkrete Anwendungen anzupassen und im Betrieb zu erproben – unterstützt durch digitalisierte Steuerungsmethoden. Mit neuen Geschäftsmodellen können künftige Marktanforderungen erfüllt werden. Sie ermöglichen auch Unternehmen aus Branchen außerhalb der heutigen Energiewirtschaft, neuartige Dienstleistungen zu erbringen. Dabei sollte auch das regulatorische Umfeld neuer Geschäftsmodelle einbezogen werden.

Abb. 10: Energiespeicher nach Ausspeicherdauer und Speicherkapazität



* ohne Industrie und GHD; Strombedarf pro Person: 1,45 MWh/a

Die Datenwolken geben Bereiche an, in denen sich einzelne heute bereits realisierte Anlagen in Deutschland bewegen.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Die technologische Bandbreite der Stromspeicher umfasst elektrochemische Speicher (Batterien, inklusive Redox-Flow-Batterien), elektrische Speicher (elektromagnetische und elektrostatische Direktspeicher), mechanische Speicher (Druckluft und -gas, Pump- sowie Schwungmassenspeicher) und Hochtemperatur-Wärmespeicher für die Stromspeicherung (siehe Kapitel 4.2.6). Ein besonderer Schwerpunkt in der Stromspeicherforschung liegt auf den unterschiedlichen Technologietypen der Batterie als zentraler technischer Komponente an wichtigen Stellen des Energiesystems. Die Forschung zur Batterie im Energieforschungsprogramm wird entlang der Wertschöpfungskette erweitert: Auf der einen Seite werden anwendungsspezifische Fragen zu Materialien, Zell-Chemie und -fertigung adressiert. Auf der anderen Seite wird die Einbindung der Batterie in mobile und stationäre Anwendungsfälle bis hin zur Entwicklung von Nutzungskonzepten und Fragen der Standardisierung untersucht. Das 7. Energieforschungsprogramm ergänzt auf diese Weise andere Programme der Bundesregierung – etwa zur Materialforschung, zur Einführung der Elektromobilität und deren Kopplung mit dem Energiesystem oder zu IKT-Technologien – und setzt die FuE-Förderung der Bundesregierung zur Batterie als Schlüsselkomponente der Energiewende in einen strategischen Gesamtzusammenhang. Neben den technischen Voraussetzungen ist für den Einsatz von Speichern insgesamt eine erhöhte Wirtschaftlichkeit essenziell. Die dafür notwendigen Kostensenkungen werden durch FuE-Themen adressiert.

Materialien und Komponenten

Die Anforderungen an die Entwicklung innovativer Materialien und Speichermedien sind breit gefächert. In der Batteriezelle etwa sollen neue Materialien die technischen Eigenschaften von Batterien verbessern und dabei kostengünstig und fertigungstechnisch gut zu verarbeiten sein. Gleichzeitig müssen sie eine hohe Sicherheit und günstige Umweltbilanz aufweisen. Durch den vermehrten Einsatz verfügbarer, unkritischer Rohstoffe verringert sich auch die Importabhängigkeit bei der Speicherherstellung.

Die Notwendigkeit zur Materialentwicklung reicht von der Zelle über das System oder Modul bis zur Peripherie, wie die folgenden Beispiele deutlich machen: Batterien in der Elektromobilität erlangen durch neue Materialien

höhere Energiedichten und Leistungsfähigkeiten für größere Reichweiten. In Redox-Flow-Batterien sind Materialien für leistungsfähige, stabile Bipolarplatten erforderlich, in Schwungmassenspeichern für Magnete. Bei elektrischen Speichern können Nanomaterialien die Elektrodenoberfläche und damit die elektrische Kapazität maximieren. Neue Arbeitsmedien können für Druckspeicher und Pumpspeicher neue Anwendungsoptionen eröffnen. Bei elektrochemischen Speichern ist die Entwicklung grundlegend neuer Zellchemien ein sehr wichtiges Forschungsfeld. Die Forschung trägt zur Erschließung von alternativen Materialien und Rohstoffquellen (zirkuläres Wirtschaften, siehe auch Kapitel 4.4.3) für z. B. Lithium, Blei, Vanadium und Kobalt bei. Auch Post-Lithium-Batterien, vor allem Metall-Luft und Festkörperbatterien spielen eine wichtige Rolle.

Schnelle, zuverlässige Messverfahren sind notwendig, um die Eignung solcher Materialien in einem frühen Entwicklungsstadium zu testen und die Entwicklung zu beschleunigen. Stromspeicher, Komponenten, Bauteile, Systeme und ihre Peripherie müssen weiterentwickelt und optimiert werden, damit sie für die jeweilige Anwendung passen, zuverlässig und sicher funktionieren. Zielgrößen sind Kosten, Gesamteffizienz, Leistungsdichte, Energiedichte, Speicherkapazität, Reaktionszeit, Langlebigkeit, Zyklusfestigkeit und die Geschwindigkeit des Be- und Entladens. Ein stabiler Betrieb ist bei hohen wie bei niedrigen Temperaturen gefordert.

Fertigung

Die Fertigung ist der technisch entscheidende Schritt, um aus den im Labor entwickelten Materialien und Komponenten ein Produkt herzustellen, das den in der Speicheranwendung geforderten Kenndaten genügt. Die Bundesregierung hat einen Aktionsplan „Batterie Innovativ“ erstellt, um die Forschungsergebnisse über einen Clusteransatz in eine großskalige Batteriezellfertigung umzusetzen. Dazu sind auch passende und digitalisierte Fertigungskonzepte („Industrie 4.0“) zu etablieren. Sie sollen durch Einsatz schneller, zuverlässiger und fertigungsintegrierter Prüfverfahren und Messtechnik sowie durch einheitliche Prüfstandards eine hohe, gleichbleibende Qualität gewährleisten. Durch eine gesteigerte Reproduzierbarkeit und frühzeitiges Erkennen von Fehlern werden Fehlchargen vermieden und so der Energieaufwand für die Produktion weiter verringert. Die Fertigung bietet außerdem ein hohes Potenzial zur Kostensenkung, indem mittels Automatisierung und

Reduktion der Bauteile große Stückzahlen günstiger herstellbar werden.

Weitere Chancen der Digitalisierung liegen in der „Production on Demand“. Sie hilft, die Wettbewerbsfähigkeit innovativer Produkte zu steigern. So können auch neuartige, individuell auf die Anforderungen der Kunden angepasste Designs gefertigt werden.

Standardisierung

Derzeit sind die Herstellerangaben vor allem bei elektrochemischen Speichern wenig vergleichbar, da es nicht ausreichend akzeptierte Standardtests gibt. Daneben fehlen international einheitliche externe und interne Schnittstellen (sowohl IKT als auch elektrische Leistungsschnittstellen) sowie eine vereinheitlichte Beschreibung. Das 7. Energieforschungsprogramm bereitet weitere Standardisierungen durch FuE-Arbeiten vor und beseitigt damit Hemmnisse in der Systementwicklung und Markteinführung.

Betrieb stationärer Speicher

Der Transfer von der Forschung in den Markt soll durch die Demonstration von Stromspeichern in konkreten Anwendungen unterstützt werden. Dabei sind technische Machbarkeit und wirtschaftliche Betriebsführung nachzuweisen. Prozesse und Verfahren sowie Konzepte zum Speichermanagement müssen optimiert, innovative Geschäftsmodelle erprobt und neue Einsatzbereiche sowie Standortmöglichkeiten erschlossen werden. Eine Hochskalierung von Anlagen und Komponenten kann den Betrieb beispielsweise von Speicheranlagen am Stromnetz oder zum Energiemanagement in Quartieren wirtschaftlicher machen. So können neue Anwendungen untersucht werden, die das künftige Energiesystem unterstützen. Neue Marktakteure lassen sich über innovative Verfahren für den Betrieb verteilter Speichersysteme gewinnen. Dabei ist auch das Optimierungspotenzial bei den regulatorischen Bestimmungen in die Untersuchung einzubeziehen. Schließlich sind sie ein Schlüssel für den Erfolg innovativer Geschäftsmodelle.

In Demonstrationsprojekten müssen die Anlagenkomponenten für einen effizienten Betrieb aufeinander abgestimmt werden. Hierfür sind geeignete Schnittstellen erforderlich. Intelligente Kommunikationstechnologien und Managementsysteme steuern die Anlage technisch

und vermarktungsstrategisch. Überwachungssysteme sind für einen optimalen technischen Betrieb und eine hohe Sicherheit zu entwickeln.

Lebenszyklus und zirkuläres Wirtschaften

Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit sind über den gesamten Lebenszyklus zu analysieren und zu optimieren. Die Produktion von Batterien erfordert den Einsatz von Rohstoffen, die in Deutschland nicht oder nur in geringen Mengen natürlich vorkommen. Geeignete Produktionsverfahren setzen gut verfügbare, stofflich möglichst unbedenkliche Materialien ein und schonen damit Ressourcen.

Die Lebenszykluskosten von Speichern können reduziert werden, indem deren Degradation verringert und die Systeme dadurch haltbarer werden. Auch neuartige Nachnutzungskonzepte für Batterien („Second Life“) erhöhen deren Nutzungsdauer. Dazu wird die Wiederverwendung von Komponenten, Speichern, Systemen und Anlagen am Ende der Lebensdauer erforscht, um sie schon bei der Technologieentwicklung zu berücksichtigen.

Die Erforschung von Recyclingverfahren nach Ende der Lebensdauer kann die Umweltverträglichkeit von Batterien verbessern und die strategische Abhängigkeit der Speichernutzung von Rohstoffimporten verringern. Diese Aspekte des zirkulären Wirtschaftens müssen bereits bei der Fertigung berücksichtigt werden. Ziel ist es, Komponenten möglichst lange weiter zu nutzen und die Rohstoffe zu einem möglichst hohen Anteil wiederzugewinnen.

Strukturen der FuE-Förderung

Sowohl Grundlagenforschung als auch angewandte Forschung sind notwendig, um Stromspeicher entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu verbessern – vom Material über Komponenten, Systeme und Anlagen bis hin zur Peripherie. Demonstrationsprojekte, Pilotanlagen, Feldtests und Reallabore sind die Instrumente des 7. Energieforschungsprogramms, um den Einsatz neuer Speichertechnologien unter annähernd realen Bedingungen zu erproben. Dazu werden die relevanten Akteure aus Forschung, Industrie, Privathaushalten, Kommunen, Netzbetrieb und Vermarktung eingebunden.

Da Stromspeicher eine Querschnittstechnologie sind, bestehen Verbindungen zu anderen Förderbereichen innerhalb des 7. Energieforschungsprogramms: bei der Einbindung von Speichern in Netze (siehe Kapitel 4.3.1), bei Speichern für Verkehr und Mobilität (siehe Kapitel 4.1.3), bei thermischen Speichern zur Wandlung von Strom und bei Speicherkonzepten für energieeffiziente Gebäude und Quartiere (siehe Kapitel 4.1.1), dem Einsatz von Speichern in Industrieprozessen (siehe Kapitel 4.1.2), bei der Sektorkopplung (siehe Kapitel 4.3.3) und der Anbindung von Speichern an Wind- und Solaranlagen (siehe Kapitel 4.2.1 und 4.2.2).

Mit dem 7. Energieforschungsprogramm werden Innovationen im Forschungsbereich Stromspeicher weiterhin technologieoffen gefördert. Dieser Ansatz hat sich in der erfolgreichen *Forschungsinitiative Energiespeicher* aus dem letzten Energieforschungsprogramm bewährt. Die Ergebnisse der Entwicklungsarbeiten werden unter dem Dach der *Forschungsnetzwerke Energie* diskutiert, sodass eine strategische Weiterentwicklung des Forschungsbereichs Stromspeicher stattfindet. Weiterhin bietet das *Batterieforum Deutschland* im Rahmen des Materialforschungsprogramms des BMBF eine Plattform für die strategische Ausrichtung der Batterieforschung in Deutschland.

Im SET-Plan und im EU Forschungsprogramm „*Horizon 2020*“ und im Nachfolgeprogramm „*Horizon Europe 2021 – 2027*“ ist die Speicherforschung in vielen Forschungsbereichen verankert (IG 4/Stabilität des elektrischen Systems; IG 7/Batteriesektor). Dort wird u. a. das Ziel verfolgt, eine Batteriezellproduktion in Europa zu etablieren (TWG 7 zu Batterien, European Battery Alliance). Europäische Kooperationen sind sinnvoll für den Erfahrungsaustausch und eine Risikoteilung bei den Entwicklungserfordernissen für Speicher. Sehr dringend, und zwar auch kurzfristig, ist eine internationale Zusammenarbeit zum Thema Standardisierung und Schnittstellen.

4.3.3 Sektorkopplung

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Die Energiewende verlief in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr bisher sehr unterschiedlich. Während im Stromsektor beachtliche Erfolge bei der Integration erneuerbarer Energien erzielt wurden, ist die Integration in den Sektoren Wärme und Verkehr bisher vor allem durch die im weiteren Ausbau beschränkte Nutzung der Biomasse

gelingen. Die Sektorkopplung, also der effiziente Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energiequellen in den Bereichen Wärme und Kälte sowie Mobilität und Transport, kann einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung der Energiewende in allen Sektoren leisten. Strom lässt sich dabei direkt nutzen, beispielsweise für Elektromobilität oder mit dem Einsatz von Wärmepumpen sowie indirekt durch die Erzeugung chemischer Energieträger (z. B. Wasserstoff). Die Sektorkopplung soll vor allem zu Synergien gegenüber dem getrennten Ausbau von Energieinfrastrukturen führen.

Mittels Sektorkopplung lassen sich neue Flexibilitätsoptionen für das Energiesystem zur Verfügung stellen, bei allerdings erhöhten Anforderungen an die Flexibilität der Einzeltechnologien sowie an Informationsaustausch und intelligente Steuerung. Denn sie müssen in einem stärker vernetzten Energiesystem in der Lage sein, flexibel auf Änderungen in der Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms zu reagieren. Die Umwandlung erneuerbaren Stroms in chemische Energieträger ermöglicht darüber hinaus eine Langzeitspeicherung von erneuerbarer Energie. Dadurch wird die Versorgungssicherheit erhöht. Technologien zur Sektorkopplung sollen so entwickelt werden, dass sie helfen, die Stabilität des Energiesystems zu erhöhen und die Kosten der Energiewende zu verringern.

Die Energieforschung kann dazu vielfältige Beiträge leisten. Das betrifft einerseits die Weiterentwicklung von Einzeltechnologien wie Wärmepumpen, Bioenergieanlagen oder elektrischen und thermischen Speichern, die auf einen flexiblen Einsatz im künftig digital vernetzten Energiesystem vorbereitet werden müssen. Daneben sollten für die Konzeptentwicklung sowie Planung und Realisierung der Sektorkopplung leistungsfähige Modellierungswerkzeuge und modernste IKT-Methoden entwickelt und auch der regulatorische Rahmen auf Optimierungspotenzial untersucht werden. Dabei sind die gesellschaftlichen und sozialen Auswirkungen zu berücksichtigen.

Dem Energieträger Wasserstoff kann im Kontext der Sektorkopplung eine besondere Bedeutung zukommen. Wasserstoff bietet Einsatzmöglichkeiten in der zentralen und dezentralen Stromerzeugung, in Fahrzeugen, zur Herstellung alternativer Kraftstoffe, Brennstoffe und Gase, zur Langzeitspeicherung sowie als Rohstoff für industrielle (insbesondere chemische) Prozesse. Sofern Wasserstoff regenerativ (z. B. aus erneuerbarem Strom in Elektrolyseanlagen) produziert wird, sind mit der Nutzung keine oder nur geringe Treibhausgasemissionen verbunden. Die Bundesregierung will mit Blick auf das hohe Exportpotenzial

für Technologien der Wasserstoffherzeugung den heimischen Produktionsstandort stärken und die gewonnene Technologieführerschaft möglichst ausbauen. Die Kosten für erneuerbaren Wasserstoff sollen durch Forschung und Innovationsförderung deutlich gesenkt werden.

Durch die Kopplung der Sektoren und die Verknüpfung der Infrastrukturen können sich erhebliche Flexibilitätspotenziale ergeben. Für die Nutzung von Wasserstoff zur Langzeitspeicherung erneuerbarer Energie stehen unterirdische geologische Formationen und nach Prüfung der technischen und kapazitiven Möglichkeiten gegebenenfalls die Gasnetzinfrastruktur zur Verfügung. Daraus ergeben sich auch neue Möglichkeiten für den Transport erneuerbarer Energie (z. B. als alternative Offshore-Anbindung). Darüber hinaus ist die Nutzung von Erdgasspeichern zur Wasserstoffspeicherung denkbar. Wasserstoff kann bereits jetzt zu gewissen Anteilen dem Erdgas in Fernleitungs- und Verteilnetzen beigemischt werden. Dies eröffnet Flexibilitäten für das Stromnetz. Dem Gasnetz, das bisher vor allem der Versorgung mit Erdgas für den Strom- und Wärmemarkt dient, könnte in Zukunft also eine neue Rolle im Energiesystem zukommen. Würde Wasserstoff in Power-to-Gas-Anlagen mit CO₂ weiter zu Methan umgewandelt, könnte das Gasnetz zudem in vollem Umfang für die langfristige Speicherung erneuerbarer Energie genutzt werden. Allerdings ist dies im Vergleich zur reinen Elektrolyse mit zusätzlichen Effizienzverlusten verbunden. Wichtige Forschungsziele sind deshalb die Steigerung der Energieeffizienz der Umwandlungsprozesse selbst sowie die sinnvolle Nutzung der bei chemischen Umwandlungsprozessen nicht vermeidbaren Abwärme, um eine hohe Systemeffizienz zu erhalten.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Sektorkopplung im Kontext des Energiesystems

Eine zukünftig ganzheitlich optimierte Energieversorgung erfordert den Vorlauf von Forschungsarbeiten aus der Systemanalyse (siehe Kapitel 4.4.1). Beispielsweise werden für eine hinreichend genaue Abbildung der Infrastrukturen umfassende Modelle und neuartige Werkzeuge und Verfahren benötigt, mit denen nationale und regionale Strategien belastbar und fundiert geplant werden können. Mit robusten systemanalytischen Modellen können die Flexibilitätspotenziale durch Sektorkopplung analysiert und ganzheitlich bewertet werden. Die Systemanalyse unterstützt somit das Verständnis der technischen, rechtlichen, volkswirtschaftlichen und sozioökonomischen Zusammenhänge.

Daneben sind Betriebs- und Wirtschaftlichkeitsanalysen, Lebenszyklusanalysen unter Einbeziehung von Recycling und techno-ökonomische Analysen sowie Sicherheitsanalysen erforderlich.

Da der derzeitige regulatorische Rahmen im Hinblick auf eine erfolgreiche Umsetzung der Sektorkopplung angepasst werden muss, besteht hierzu erheblicher Bedarf an Forschungsarbeiten, die gegebenenfalls im Rahmen der Reallabore der Energiewende umgesetzt werden können (siehe Kapitel 3.1). Energieinfrastrukturen machen nicht an den Grenzen Deutschlands halt. Die Sektorkopplung muss deshalb europäisch gedacht und umgesetzt werden.

Direkte Nutzung von Strom in anderen Sektoren

Um die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms im Bereich Mobilität und Transport zu ermöglichen, sind Methoden für das gesteuerte Laden und Entladen von Elektrofahrzeugen (vehicle-to-grid) sowie verbesserte Batterien zu entwickeln. Weitere Forschungsthemen betreffen das netzdienliche Laden, innovative Oberleitungssysteme oder effiziente DC-Netze. Parallele, hochdynamische Entwicklungen im Bereich Mobilität und Transport (z. B. autonomes Fahren, unmanned aerial vehicles (UAV), neue Trends der Mobilität wie urbaner Radverkehr oder Carsharing) müssen bei der Forschung zur Sektorkopplung ebenfalls mitbedacht werden. Im Bereich der Wärme- und Kälteversorgung kann erneuerbarer Strom entweder direkt oder mittels Wärmepumpen (inkl. Klimaanlage) eingesetzt werden. Neben der Forschung und Entwicklung zu Einzeltechnologien sind hier ganzheitliche Konzepte für Wärme-/Kältesysteme vor allem im Kontext von Gebäuden und Quartieren gefragt.

Erzeugung von Wasserstoff und weiteren chemischen Energieträgern aus erneuerbarem Strom

Die Sektorkopplung erfordert in vielen Fällen die Umwandlung elektrischer Energie in synthetische Gase, alternative Kraftstoffe oder chemische Rohstoffe (Power-to-Gas, -Fuel/-Liquids und -Chemicals). Die Effizienz, die Flexibilität und die Wirtschaftlichkeit entsprechender Anlagen sind deutlich zu steigern. Diese Technologien müssen für unterschiedliche Größenklassen verfügbar gemacht werden, inklusive effizienter Pfade der weiteren Umwandlung. Da zur Herstellung der meisten synthetischen Kraft- und Brennstoffe neben elektrischer Energie auch Kohlenstoff als Rohstoff benötigt wird, hat die Sektorkopplung enge

Bezüge zu CO₂-Technologien und zur Biogaserzeugung. CO₂ wird auf diese Weise neben Wasserstoff ein weiteres Scharnier der Sektorkopplung (siehe Kapitel 4.4.4).

In den meisten Fällen steht am Beginn solcher Umwandlungsprozesse die Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyseanlagen. Ein wirtschaftlicher Betrieb solcher Anlagen erfordert die Optimierung aller Prozesse der Herstellung, Speicherung, Konditionierung, Transport und Wandlung von Wasserstoff innerhalb einer technisch effizienten, bedarfsorientierten und flächendeckenden Infrastruktur. Wesentliche Herausforderungen sind neben den Kosten die Steigerung der Energieeffizienz der Prozesse und die sinnvolle Nutzung nicht vermeidbarer Abwärme. Technologische Optionen und Design-Revisionen hinsichtlich Konzepten, Systemtechnologien, Prozessen, Peripherie, Komponenten und Materialien sind genauso Forschungsgegenstand wie eine ferngesteuerte, automatisierte und systemdienliche Betriebsführung im Strommarkt. Bei den verschiedenen Technologien der Elektrolyse steht weiterhin die durch Langzeitdaten gestützte Forschung an Performance, Dynamik und Flexibilität, Degradation und Lebensdauer sowie Skalierung, Effizienz und Leistungsdichte im Fokus. Anwendungsorientierte Grundlagenforschung stellt Technologien der nächsten Generation bereit und trägt maßgeblich zur Senkung der Anlagenkosten bei. Serientaugliche Prozesse für großskalige Elektrolyseure erfordern optimierte Produktionsverfahren. Eine Standardisierung und Normung der Prozesse und Bauteile unterstützt ihre Entwicklung.

Bei der nachhaltigen Produktion von Wasserstoff setzt die Bundesregierung, wie im gesamten Energieforschungsprogramm, auf Technologieoffenheit. Sie unterstützt daher die Erforschung vielversprechender neuer Pfade, auch außerhalb einer engen Definition von Sektorkopplung, wie z. B. die Methanpyrolyse zur kontrollierten, klimaneutralen Aufspaltung von Methan in Wasserstoff und elementarem Kohlenstoff, der als wertvoller Rohstoff in der chemischen Industrie benötigt wird. Die Erzeugung von Wasserstoff oder anderen chemischen Energieträgern mittels erneuerbarer Energie im Sonnengürtel der Erde eröffnet zudem eine globale Perspektive (siehe Kapitel 4.1.3).

Leuchtturmprojekte mit großen Elektrolyseanlagen in Metropol- und Industrieregionen und dezentralen Anlagen für Vorort-Verbraucher können die komplette Wertschöpfungskette untersuchen. Die Erweiterung auf energiemarktnahe, systemische Projekte, z. B. als Reallabore oder als Weiterentwicklung von *Kopernikus-Projekten* kommt

diesem Forschungsbedarf entgegen. Dies gilt insbesondere für die Systemintegration der Wasserstoffherzeugung, mögliche Wasserstoff-Leitungsnetze, die Überführung der Wasserelektrolyse in den industriellen Maßstab und die digitale Vernetzung innerhalb der gesamten Energiewirtschaft. Aus Gesamtsystemsicht sind vor allem Salzkavernen (Kavernenspeicher) und poröse Formationen (Porenspeicher) zur großvolumigen Langzeitspeicherung geeignet. Sie bedürfen aber weiterer Erforschung. Untersuchungen zum Potenzial geologischer Formationen, zur Auslegung notwendiger technischer Installationen, aber auch von Fragen zu Genehmigung, Bau und Betrieb sowie möglichen Risiken sind wichtige Grundlagen für die künftige Errichtung realer Gigawatt-Elektrolyse-Speicher-Anlagenparks. Weitere Forschungsfragen beziehen sich auf funktionsfähige feste Wasserstoffspeicher und alternative, neuartige Speicher wie organische Flüssigkeiten. Denn die sichere und benutzerfreundliche Verwendbarkeit von Wasserstoff ist eine Grundvoraussetzung der Technologieentwicklung. Akzeptanz- und Partizipationsforschung kann helfen, die Bedürfnisse und Präferenzen von Nutzerinnen und Nutzern frühzeitig zu identifizieren und einzubinden.

Die Rückverstromung von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff (oder daraus erzeugten Brennstoffen) bietet eine Option zur langfristigen Stromspeicherung. Hierbei stellt die Hybridisierung mit anderen Speichern eine erhebliche Herausforderung dar. Ihre Umsetzung kann mit Brennstoffzellen oder stationären Verbrennungsmotoren erfolgen. Reversible Brennstoffzellen-/Elektrolysesysteme sind in diesem Zusammenhang ein wichtiges Forschungsthema. Alle eingesetzten Materialien sollen unter Beachtung kritischer Ressourcen analysiert und so weit wie möglich im Einsatz reduziert oder durch Alternativen substituiert werden. Die Materialforschung an bestehender Infrastruktur hat das Ziel höherer Wasserstoffgehalte. Sie ist relevant für einen Ausbau der Infrastruktur und wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Verknüpfung von Strom- und Gasinfrastruktur

Die Verknüpfung der Gasinfrastruktur mit dem Stromsektor erfordert unter anderem die wissenschaftliche Weiterentwicklung von integrierten Planungsmethoden, die beispielsweise die Bestimmung optimaler Standorte für Power-to-Gas-Anlagen unterstützen können. Bei der Ermittlung der Kapazitäten von Gasleitungen zur Speicherung von Wasserstoff ist die Wasserstoffverträglichkeit diverser Elemente des Gasnetzes und angeschlossener Geräte zu

untersuchen. Dies trifft auch auf die Toleranz der Gasleitungen auf verschiedenen Druckebenen hinsichtlich wasserstoffinduzierter Korrosion und Diffusion zu. Dabei muss die Dynamik der Einspeisung besonders berücksichtigt werden. Mit der Entwicklung von Verfahren zur Separierung des Wasserstoffs aus dem Gasstrom könnte das Gasnetz weitere Aufgaben im Rahmen der Energiewende übernehmen. In diesem Zusammenhang sind lokale und regionale Betrachtungen der spezifischen Gasnetzinfrastrukturen wichtig, um zusätzliche Wasserstoffspeicherpotenziale zu erschließen. Zur Erhöhung des möglichen Wasserstoffanteils in Gasnetzen sollten beispielsweise neue Leitungs- und Beschichtungsmaterialien und deren Einsetzbarkeit erforscht werden. Da eine Veränderung der Zusammensetzung des transportierten Gases Auswirkungen auf die Gasleitungen und Armaturen hat, sind auch die Methoden zur Schadenserkenkung z. B. in Leitungen anzupassen.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass das Gasnetz in einem europaweiten Verbund organisiert ist. Durch den im Wachstum befindlichen Markt für Flüssiggas und seine Eignung z. B. für Schiff- und LKW-Antriebe ergeben sich weitere Herausforderungen, die im Kontext der Sektorkopplung bedacht werden müssen. Dies betrifft beispielsweise optimale Standorte von Verflüssigern, Schwankungen von Gaszusammensetzungen und die Charakterisierung der Brenngase (Wobbeindex) sowie deren Auswirkungen auf Gasnetzkomponenten, Speicher- und Endkundenanlagen sowie auf Sicherheitsaspekte. Insofern besteht insgesamt ein hoher Bedarf an der Weiterentwicklung intelligenter Technologien zur Brennermittlung und -nachverfolgung.

Sektorkopplung aus Nutzersicht

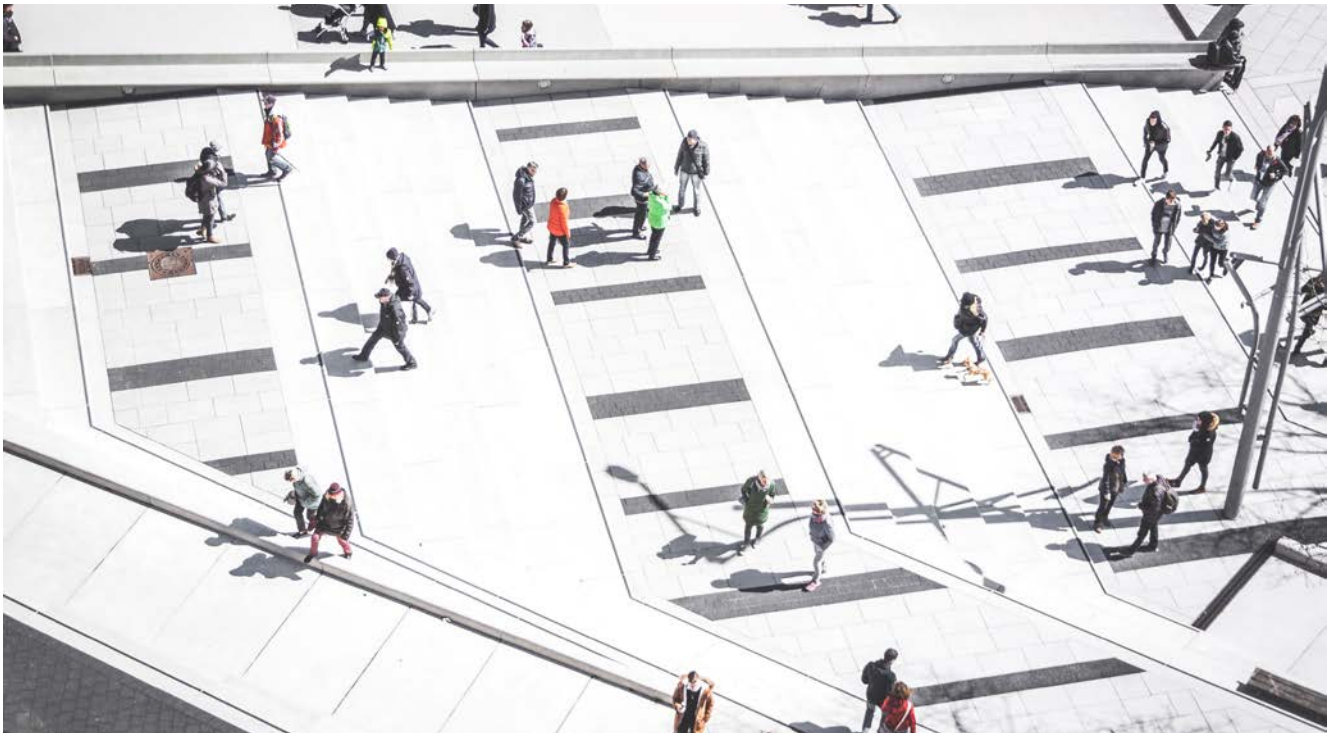
Eine zentrale Rolle für den Erfolg der Energiewende im Mobilitäts- und Wärmemarkt spielen die Menschen. Konzepte der Sektorkopplung sollen so entwickelt werden, dass die Umsetzung zu deren Wünschen und Bedürfnissen passt. Auch das Verhalten von Verbrauchern und Nutzern muss bei der Entwicklung von Konzepten zur Sektorkopplung eingehend modelliert und beachtet werden. Forschungsarbeiten zu Akzeptanz und Partizipationsformaten können helfen, Transformationsprozesse verständlich zu machen und faire Rahmenbedingungen zu schaffen. Bei der Technologie- und Konzeptentwicklung ist zudem zu beachten, dass der Aus- oder Umbau von Energieinfrastrukturen mit Blick auf die Interessen der Menschen vor Ort gestaltet werden muss.

Strukturen der FuE-Förderung

Die weitere Umsetzung der Sektorkopplung erfordert neben der Entwicklung von Einzeltechnologien (siehe Kapitel 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.2.3, 4.2.6, 4.3.1 und 4.3.2) umfangreiche Demonstrationsprojekte. Die modellhafte Verknüpfung von Infrastrukturen kann nur in Projekten mit systemischem Charakter erprobt werden. Hierzu sind insbesondere die Reallabore der Energiewende (siehe Kapitel 3.1) geeignet, da im Rahmen der Technologieerprobung abgabenbehaftete Güter (z. B. Strom, Gase und Kraftstoffe) eingesetzt und produziert werden. Gegebenenfalls erfordert der Probetrieb entsprechender Anlagen regulatorische Ausnahmen. Insgesamt hat das Thema Sektorkopplung viele Anknüpfungspunkte zur Systemanalyse und sozio-ökonomischen Forschung (siehe Kapitel 4.4.1 und 4.4.5) sowie zur Einbindung moderner IKT (siehe Kapitel 4.4.2).

Die Rolle der Sektorkopplung zur Stabilisierung der Stromnetze wird im *Forschungsnetzwerk Stromnetze* in eine Beziehung zu anderen Methoden der Netzplanung und des Netzbetriebs gesetzt. Bioenergie als Systemintegrator im Kontext der Sektorkopplung wird im *Forschungsnetzwerk Bioenergie* behandelt. Die Nutzung erneuerbarer Energien im Bereich Wärme/Kälte ist ein wichtiger Aspekt im *Forschungsnetzwerk ENERGIEWENDEBAUEN*. Die Elektrolyse wird im *Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung* thematisiert. Aufbauend auf den existierenden Strukturen soll die Vernetzung von Akteuren mit einem Fokus auf die Sektorkopplung weiter intensiviert werden.

Da die Sektorkopplung auch außerhalb Deutschlands intensiv diskutiert wird, ist sie ein Thema des SET-Plans (IG 8/ Auf erneuerbaren Energien basierender Wasserstoff; IG 9/ Synthetische Kraftstoffe) und der Förderprogramme der Europäischen Kommission. Da Erprobungsprojekte mit systemischem Charakter einen erheblichen Finanzierungsbedarf umfassen und eine länderübergreifende Erprobung der Sektorkopplung neue Forschungsinhalte berühren wird, sind eine Zusammenarbeit der Fördermittelgeber im Rahmen des SET-Plans und ein Rückgriff auf Fördermechanismen der Europäischen Kommission anzustreben. Die Wasserstofftechnologie findet sich auf europäischer Ebene zudem im Arbeitsprogramm des *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH JU) wieder. Auf internationaler Ebene widmet sich die *Hydrogen Innovation Challenge* im Rahmen von Mission Innovation diesem Thema.



4.4 Systemübergreifende Forschungsthemen der Energiewende

4.4.1 Energiesystemanalyse

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Im Zuge der Energiewende befindet sich das Energiesystem in einem tiefgreifenden Wandel. Dezentrale Erzeugungsstrukturen, fluktuierende Einspeisung, Sektorkopplung, digitale Vernetzung oder auch neue Mobilitätskonzepte erfordern ein Umdenken auf vielen Ebenen. Diese Entwicklungen erfolgen innerhalb eines sehr komplexen Umfelds mit zahlreichen technischen, wirtschaftlichen, ökologischen, energiepolitischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Um hier sinnvoll agieren zu können, benötigen Wirtschaft, Politik und Gesellschaft umfangreiches faktenbasiertes Orientierungswissen zu wahrscheinlichen Entwicklungspfaden des Energiesystems und deren potenziellen Auswirkungen.

Dieses Orientierungswissen können systemanalytische Untersuchungen liefern. Sie stellen der Politik, Gesellschaft und Wirtschaft wissenschaftlich fundierte Entscheidungshilfen und Handlungsoptionen bereit, um beispielsweise die Auswirkungen der Einführung neuer Technologien oder von Markteingriffen rechtzeitig und umfassend

beurteilen zu können. Die Neu- und Weiterentwicklung systemanalytischer Werkzeuge, Methoden und Datenbanken ist daher ein zentraler Baustein der Energieforschungspolitik. Kern der Energiesystemanalyse sind Energiesystemmodelle. Innerhalb dieser werden einzelne Prozesse, Sektoren oder das gesamte Energiesystem quantitativ abgebildet. Mit ihnen können die Auswirkungen möglicher Entwicklungspfade des Energiesystems oder das Zusammenspiel von bestehenden und neuen Energietechnologien analysiert werden. Um die Komplexität des zukünftigen Energiesystems adäquat abbilden zu können, ist das Zusammenspiel vieler verschiedener Fachdisziplinen wie den Ingenieurwissenschaften, der Ökonomie, der angewandten Mathematik, der Informatik, den Sozialwissenschaften und den Rechtswissenschaften notwendig.

Ein systemanalytisches Modell kann und soll keine Prognosen im Sinne von Zukunftsvorhersagen erstellen. Denn dazu ist das Energiesystem mit seiner Vielzahl an veränderlichen Rahmenbedingungen viel zu komplex. Durch die Identifikation von Wirkzusammenhängen und spezifischen Effekten sowie die Untersuchung von Sensitivitäten können aber die potenziellen Auswirkungen verschiedener Optionen zur Ausgestaltung der Energiewende (Szenarien) besser beurteilt werden. Die Anzahl möglicher Entwick-

lungspfade, die mit Simulationsmodellen erzeugt werden können, ist so groß, dass eine überschaubare Anzahl von Szenarien ausgewählt werden muss. Dadurch können unterschiedlichste Analyseschwerpunkte gesetzt werden.

Die Validierung systemanalytischer Modelle ist deshalb von zentraler Bedeutung, um das Instrument der Szenarien-Untersuchungen nicht zu diskreditieren. Es besteht daher ein sehr hoher Bedarf an Transparenz bei der Entwicklung solcher systemanalytischer Werkzeuge. Denn Gesellschaft und Politik haben Anspruch auf wissenschaftlich fundierte Hilfestellung bei Entscheidungsprozessen. Die Ergebnisse einer systemanalytischen Untersuchung müssen transparent, nachvollziehbar und von Dritten überprüfbar sein. Nur dann können sie als belastbare Grundlage für Weichenstellungen zur künftigen Ausgestaltung des Energiesystems dienen.

Die Entwicklung entsprechender Validierungsmethoden ist daher ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. Hierzu gehören Modellvergleiche, der Abgleich von Simulationsergebnissen mit historischen Datenreihen, die Verifikation allgemeiner Eigenschaften wie interner Konsistenz und geringer Parametersensitivitäten oder die Überprüfung von Eingangsdaten und Parameterwerten.

Die Reduzierung von Komplexitäten unter Beibehaltung des notwendigen Detaillierungsgrades in systemanalytischen Modellen ist eine zentrale Herausforderung der systemanalytischen Forschung. Welche Facetten der Realität in systemanalytischen Modellen abgebildet werden müssen, hängt von der jeweiligen Fragestellung ab. Gerade im Energiebereich ist eine detaillierte Abbildung der Nachfrage- und Erzeugerseite von entscheidender Bedeutung, um neben ökonomischen auch weitere Einflussfaktoren auf Entscheidungsprozesse von Akteuren berücksichtigen zu können.

Strategisch wichtige FuE-Themen

In der Systemanalyse sind die Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen technologischen, regulatorischen sowie sozialen Fragestellungen zu untersuchen und Konzepte zur Optimierung des sozio-technischen Energiesystems zu entwickeln. Im Fokus der Systemanalyse als Forschungsdisziplin steht die Entwicklung allgemeiner Metho-

den und Werkzeuge. Ihre praxisübliche Anwendung für konkrete systemanalytische Fragestellungen ist Gegenstand von Studien und Gutachten, die die Bundesregierung im Kontext der wissenschaftlichen Beratung beauftragt. Wichtige Forschungsthemen sind neben der eigentlichen Methodenentwicklung vor allem die Validierung und Transparenz, Möglichkeiten der Modellkopplung sowie die Stärkung der internationalen Perspektive und Zusammenarbeit.

Methodenentwicklung

Um mit der steigenden Komplexität des Energiesystems umgehen zu können, ist eine kontinuierliche Methodenentwicklung notwendig – beispielsweise die Entwicklung standardisierter Schnittstellen, um unterschiedliche Modelle miteinander (auch über Sektoren hinweg) koppeln zu können. Ihr modularer Aufbau bietet den Vorteil, die erzielten Ergebnisse besser austauschen zu können. Außerdem sind neue Ansätze für die bisher unzureichend abgebildeten Sektoren des Energiesystems zu entwickeln. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf intersektoralen Modellansätzen und einer besseren Integration des Wärme- und des Verkehrssektors in die Energiesystemmodellierung. Weitere wissenschaftliche Herausforderungen bestehen darin, die Rechenzeit zu reduzieren (z. B. durch Parallelisierung von Modellläufen). Modellvereinfachungen lassen sich durch empirische Näherungsverfahren und die Anwendung lernender Algorithmen (maschinelles Lernen, KI) erreichen. Wichtig ist es auch, moderne statistische Methoden (z. B. im Kontext von Big Data) zu integrieren.

Das Entscheidungsverhalten der Akteure im Energiesystem, das nicht einer reinen Kostenminimierung entspricht, soll in Zukunft noch besser erfasst werden. Moderne Ansätze der Verhaltensökonomik werden daher stärkere Berücksichtigung finden. Dies betrifft auch die sozialwissenschaftliche Forschung. Weiteren Entwicklungsbedarf gibt es bei der Verbesserung von Methoden zur Abbildung von Markt- und Diffusionsbarrieren bei der Einführung neuer Technologien. Auch die Auswirkungen neuer regulatorischer Rahmenbedingungen sollen verstärkt einbezogen werden.

Systemanalytische Modelle werden nicht nur zur Untersuchung von Zukunftsszenarien, sondern auch zur Analyse vergangener Entwicklungen benötigt. Denn in einem kom-

plexen Umfeld ist eine rückkoppelnde detaillierte Analyse erforderlich, um Wirkmechanismen von Maßnahmen besser bewerten zu können.

Validierung

Methoden zur Modellvalidierung sind anwendungsspezifisch zu entwickeln, da die jeweiligen Modelle verschiedene Teilaspekte des Energiesystems unterschiedlich gut abbilden. Ein erprobtes Mittel zur Validierung ist der Modellvergleich: Verschiedene Modelle untersuchen bei weitgehend gleicher Wahl von Eingangsdaten und Szenarien dieselbe Fragestellung.

Differenzen in den Modellergebnissen geben oft Aufschluss über die unterschiedlichen Funktionsweisen und Grundannahmen der jeweiligen Modelle und gegebenenfalls Hinweise auf mögliche Verbesserungspotenziale. Weitere Forschungsthemen sind der Vergleich von Modellierungsergebnissen mit historischen Daten sowie die Verbesserung der Modelleigenschaften durch Sensitivitätsanalysen, d. h. die Untersuchung der Abhängigkeit der Ergebnisse von Änderungen in den gewählten Annahmen. Auch die Entwicklung von Methoden zur Verifikation allgemein wünschenswerter Modelleigenschaften wie interne Konsistenz oder geringe Parametersensitivität zählt zu den wichtigen Forschungsthemen.

Die Etablierung allgemeiner Maßnahmen der Qualitätssicherung für öffentlich geförderte Simulationsmodelle ist eine zentrale Anforderung im Rahmen des Energieforschungsprogramms. Dazu gehören eine geeignete Dokumentation und Veröffentlichung von Annahmen, Programmen, Daten und Ergebnissen sowie die Überprüfung von Eingangsdaten und Parameterwerten.

Transparenz

Die Bundesregierung wird die Vergleichbarkeit und Transparenz energiesystemanalytischer Modellierung durch eine wirksame Open-Source-, Open-Data- und Open-Access-Strategie stärken, um die Überprüfbarkeit der daraus abgeleiteten Handlungsoptionen sicherzustellen. Um eine

Transparenz der Modellierungsergebnisse auch langfristig zu gewährleisten, wird der Aufbau einer vernetzten, offenen und systematischen Dateninfrastruktur für systemanalytische Forschungsvorhaben unterstützt.

Internationale Perspektive

Energiesystemanalytische Forschungsarbeiten müssen den internationalen Kontext stärker einbeziehen, beispielsweise durch Kooperation mit europäischen und internationalen Partnern und die Erweiterung bestehender Modelle um europäische und internationale Einflussfaktoren. Dazu zählt beispielsweise das Potenzial erneuerbarer Energien in Form von chemischen Energieträgern, die künftig aus anderen Regionen der Welt importiert werden könnten.

Strukturen der FuE-Förderung

Da es sich bei der Energiesystemanalyse nicht um eine direkte technologische Entwicklung handelt und der Fokus auf der methodischen Weiterentwicklung des systemanalytischen Instrumentariums liegt, sind die Akteure überwiegend im universitären oder außeruniversitären Forschungsumfeld zu verorten. Für den wissenschaftlichen Austausch und zur gemeinsamen Arbeit an übergreifenden Projekten werden Formate des *Forschungsnetzwerks Energiesystemanalyse* genutzt. Das Netzwerk ist offen für die Mitwirkung von Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft, die eigene energiesystemanalytische Werkzeuge entwickeln.

Als interdisziplinäres Forschungsfeld hat die Systemanalyse starke Bezüge zu vielen technologisch orientierten Förderbereichen, insbesondere zu solchen mit systemischem Charakter wie beispielsweise Stromnetze (siehe Kapitel 4.3.1), Sektorkopplung (siehe Kapitel 4.3.3), Energiespeicher (siehe Kapitel 4.3.2 und 4.1.1), den Verbrauchssektoren (siehe Kapitel 4.1), den *Kopernikus-Projekten* und den Reallaboren der Energiewende (siehe Kapitel 3.1).

4.4.2 Digitalisierung der Energiewende

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Die Digitalisierung der Energiewende steht als Sammelbegriff für eine Vielzahl hochdynamischer Entwicklungen im Bereich moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und deren Auswirkungen auf das Energiesystem. Sie kann eine Schlüsselrolle bei der Lösung bestehender und zukünftiger Herausforderungen der Dezentralisierung, Flexibilisierung und effizienten Nutzung von Energie und Ressourcen einnehmen und wirkt in ihren unterschiedlichen Ausprägungen im gesamten Energiebereich.

Eine umfassende informationstechnische Vernetzung aller Elemente des Energiesystems kann die zukünftig weitgehend dezentrale und fluktuierende Energiebereitstellung handhabbar machen. Gleichzeitig führt sie aber zu einer Erhöhung der Komplexität und schafft weitere Abhängigkeiten. Die Zuverlässigkeit und Sicherheit des Energiesystems, die die Grundlage für Wohlstand und industrielle Leistungsfähigkeit in Deutschland ist, darf mit weiter zunehmender Digitalisierung und Automatisierung nicht infrage gestellt werden. Die Vielfalt technischer Systeme, beteiligter Akteure und regionaler Besonderheiten hinsichtlich Energieangebot und -nachfrage führt vor diesem Hintergrund zu besonderen Herausforderungen.

Die Umsetzung der Digitalisierung der Energiewende erfordert sowohl die Entwicklung von Sicherheitskonzepten als auch Konzepten für die Resilienz hochgradig vernetzter Systeme. Damit sollen im Aufbau wie Betrieb neuer Systeme Fehlersituationen ausgeschlossen oder deren Auswirkungen begrenzt werden, sodass sie beherrschbar bleiben. Dazu müssen aufgrund der in großer Menge anfallenden Operativdaten Methoden, Konzepte und IT-Werkzeuge für die effiziente Datenhaltung, -verarbeitung und -auswertung weiterentwickelt werden. So lassen sich die bestmögliche Nutzung fluktuierender Energiequellen und eine weitgehende Flexibilisierung der Nachfrageseite im Energiesystem (Haushalte, Industrie, Verkehr) sicherstellen.

Im Kontext industrieller Anwendungen ermöglichen Digitalisierung und Automatisierung die Optimierung von Produktionsprozessen zur Steigerung der Energie- und Res-

sourceneffizienz. Dies betrifft auch die Anpassung energie-technischer Anlagen an die jeweiligen Standortbedingungen.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Die Digitalisierung berührt nahezu alle Bereiche der Energieforschung. Mit ihren Möglichkeiten zur Flexibilisierungs- und Effizienzsteigerung für das Energiesystem birgt sie vielfältige Chancen, jedoch zugleich Herausforderungen, aus denen sich interdisziplinäre Bedarfe für Forschung und Entwicklung in verschiedenen übergreifenden Feldern ableiten. Zu nennen sind folgende:

- Internet of Things (u. a. Smart Grids, smarte Quartiere, smarte Fabriken, autarke Sensoren, Automatisierung und Industrie 4.0)
- Big Data Analytics (Methoden der Verarbeitung großer Datenmengen, angewandt z.B. in Prognosen oder in der Zustandsüberwachung)
- Künstliche Intelligenz (z. B. maschinelles Lernen, angewandt von der Produktion bis hin zu Prognosen)
- IKT-Sicherheit und Resilienz des Energiesystems (Widerstandsfähigkeit digitaler Infrastrukturen, systemische und vernetzte Risiken), auch in Bezug auf Schutzmaßnahmen an Schnittstellen zu anderen Sektoren und Systemen, z. B. dem Mobilitätsbereich
- Datenhandling, Datenschutz, Datennutzungsrechte und Standardisierung (angepasste Methoden der Datenerfassung und des Datenhandlings; Entwicklung standardisierter Schnittstellen wie z. B. im Smart Grid für eine netzdienliche Steuerung)
- Simulationsmethoden (z. B. Materialscreening, Anlagen- und Prozesssimulation, Gebäude- und Quartiersplanung, Digital Twin)
- Mensch-Maschine-Interaktion (z. B. Augmented Reality, automatisierte Beleuchtung und Temperaturregelung, Benutzerfreundlichkeit digitaler Technologien)
- Robotik (z. B. Produktion, automatisierte Anlagenüberwachung und Wartung)

- Open-Science (Oberbegriff für Open-Source, Open-Access, Open-Data, zum Zwecke höherer Transparenz und Reproduzierbarkeit in der digitalen Welt)
- innovative digitale Geschäftsmodelle (z. B. mittels virtueller Kraftwerke, digitaler Plattformen und Marktplätze)

Aufgrund der schnellen Entwicklung im IKT-Bereich ist die Forschungsförderung im Kontext der Digitalisierung kontinuierlich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Neben der Neuentwicklung digitaler Produkte und Prozesse steht auch die Adaption von Energietechnologien an Entwicklungen im IKT-Bereich im Fokus (z. B. 5G, Cloud-Computing, Quantencomputer oder Blockchain-Technologie). Es gilt, kommende und bereits etablierte Entwicklungen für die Energiewende nutzbar zu machen.

Strukturen der FuE-Förderung

Bei der Digitalisierung handelt es sich um ein Querschnittsthema von besonderer Tragweite. Es ist in allen Teilbereichen der Energieforschung und den dazugehörigen Forschungsnetzwerken präsent, oft aber in unterschiedlichen Aspekten und Schwerpunkten. Deshalb wird es nicht in einem eigenen, sondern in allen *Forschungsnetzwerken Energie* (siehe Kapitel 3.3) adressiert. Wo sich innovative Ideen zur Digitalisierung der Energiewende mit den bestehenden regulatorischen Rahmenbedingungen nur schwer realisieren lassen, können die Reallabore der Energiewende (siehe Kapitel 3.1) in Einzelfällen einen Beitrag zur Erprobung neuer Technologien und Konzepte leisten.

4.4.3 Ressourceneffizienz für die Energiewende

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Der verantwortungsvolle Umgang mit natürlichen Ressourcen ist ein wichtiges Ziel der Bundesregierung. Die Energiewende trägt vor allem dazu bei, indem fossile Ressourcen durch erneuerbare Energien substituiert

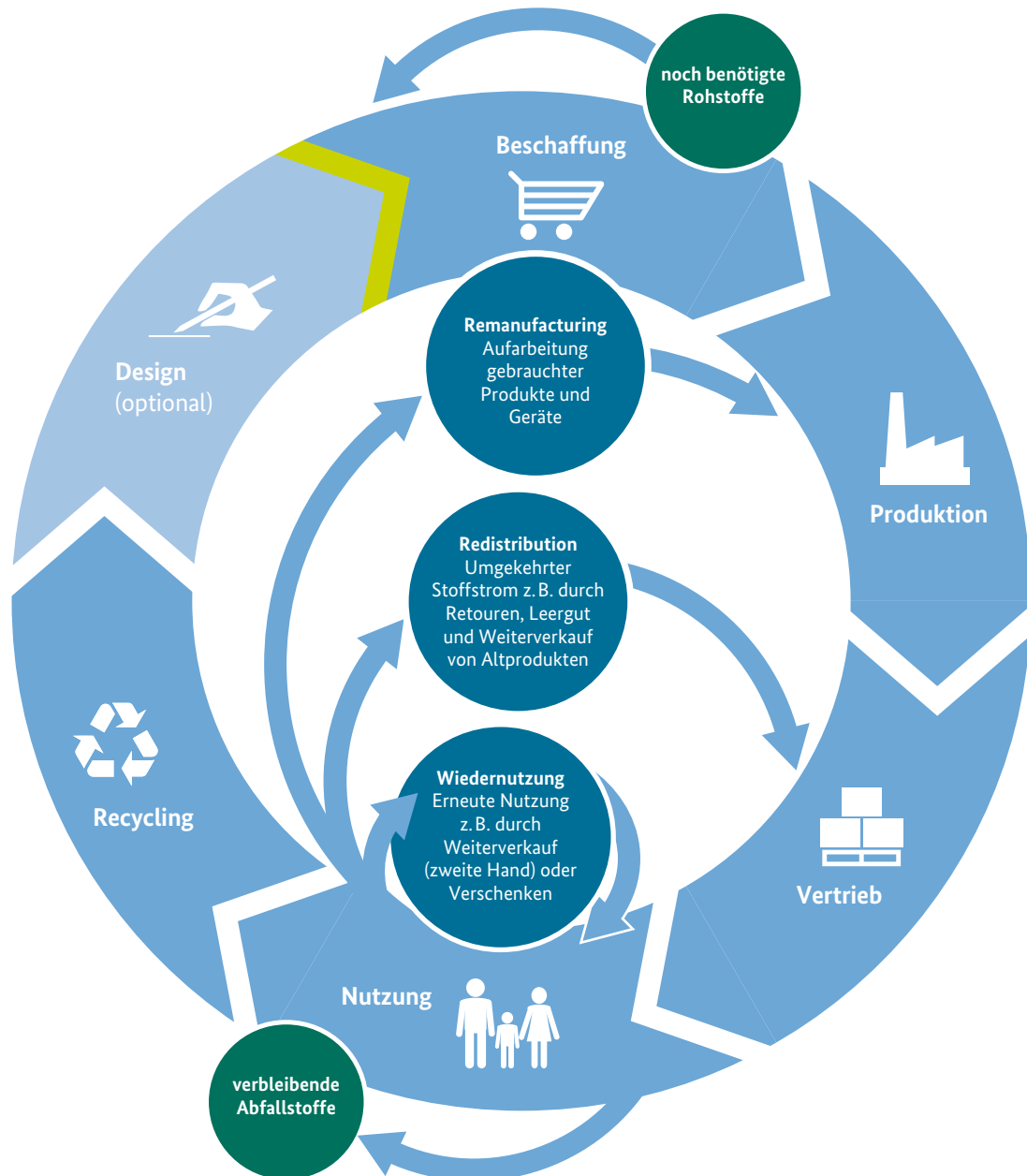
werden. Dieser Beitrag wird beispielsweise durch erhebliche Infrastrukturinvestitionen in Erzeugungsanlagen für erneuerbare Energien und Stromnetze, aber auch durch die Sektorkopplung und Digitalisierung der Energiewende ermöglicht. Neue Energie- und Speichertechnologien, der Ausbau von Energieinfrastrukturen sowie die Elektromobilität haben jedoch auch einen erheblichen Rohstoff- und Ressourcenbedarf und verändern die Nachfrage am internationalen Rohstoffmarkt maßgeblich.

Forschung zu den Ressourcen für die Energiewende trägt dazu bei, strategische und begrenzt verfügbare Rohstoffe zu schützen und nachhaltig zu verwenden. Dies mindert das Risiko, dass sich die Energiewende durch steigende Rohstoffpreise beziehungsweise Rohstoffverknappung verteuert und selbst gefährdet. Die sichere Bereitstellung von Rohstoffen und deren energieeffiziente Nutzung sind sowohl für das Gelingen der Energiewende als auch für die Aufrechterhaltung der Produktion, für einen hohen Beschäftigungsstand und stetiges Wirtschaftswachstum des Industrie- und Technologiestandorts Deutschland unerlässlich.

Die Energiewende umfasst schließlich auch Aspekte der Material- und Ressourceneffizienz, indem mittels Forschung besonders energieintensive Materialien substituiert, sparsamer verwendet oder einer Wiederverwendung zugeführt werden. Auch Innovationen in der Digitalisierung und Automatisierung können in der Energiebranche und Industrie große Beiträge zur Ressourceneffizienz leisten.

Die bisherigen Recyclingquoten reichen allein nicht aus, um den künftigen Rohstoffbedarf der Energiewende nachhaltig zu decken. Zusätzlich soll daher der strategische Ansatz der zirkulären Wirtschaft („Circular Economy“) erforscht und damit das Modell der Kreislaufwirtschaft weiterentwickelt werden. Es sieht vor, den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall und Emissionen zu erzeugen. Eine Wieder- und Weiterverwendung von Waren ohne Qualitätsverlust ist Kern der zirkulären Wirtschaft. Erneuerbare Energien sollen darin den sparsamen Energieverbrauch decken.

Abb. 11: Modell des zirkulären Wirtschaftens



Quelle: Projektträger Jülich

Die Ressourcenforschung für die Energiewende widmet sich zugleich einer prioritären Zukunftsaufgabe aus der Hightech-Strategie für Deutschland. Die EU hat darüber hinaus den Aktionsplan *Circular Economy* verabschiedet mit dem Ziel, ein grünes Wachstum und die Reindustrialisierung Europas zu ermöglichen.

Somit trägt die Energieforschung zu den drei zentralen Handlungsfeldern Rohstoffsicherung, Energie- und Ressourceneffizienz sowie zirkuläre Wirtschaft bei.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Die Forschung soll vor allem die Substitution der im Rahmen der Energiewende verstärkt nachgefragten Rohstoffe durch besser verfügbare oder durch Sekundärrohstoffe adressieren sowie die Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern erhöhen (z. B. durch Leichtbau oder Rohstoffsubstitution). Zudem soll sie Designgrundlagen für Erzeugungs-, Verteilungs- und Wandlungsanlagen der Energiewende schaffen, die eine anschließende stoffliche (Wieder-) Verwertung wesentlich erleichtern. Auch die energetische Verwertung nicht-biogener Rest- und Abfallstoffe ist beispielsweise durch Vergasungstechnologien zu verbessern. Die Quote der zurückgewonnenen Rohstoffe von Erzeugungsanlagen für erneuerbare Energien (beispielsweise von PV-Anlagen) soll mit Unterstützung der Forschung erhöht und die Nutzungsphase von Energietechnologien mit begrenzt verfügbaren Ressourcen verlängert werden.

Im Bereich der Entwicklung von Windenergieanlagen zielt die Forschung beispielsweise darauf ab, die Lebensdauerkosten durch mehr Ressourceneffizienz, den Einsatz von Leichtbautechnologien und eine ganzheitliche Betrachtung des Anlagendesigns vom Anlagenenertrag über die Lebensdauer der Anlage bis hin zum Rückbau/Recycling der Komponenten zu verringern. Ähnlich geht es bei der Entwicklung von PV-Modulen darum, die bisher teilweise verwendeten gesundheitsgefährdenden Materialien (wie Blei und Cadmium) oder knappe Ressourcen (wie Indium) zu reduzieren oder komplett zu vermeiden. Bei energieoptimierten Gebäuden und Industrieprodukten stehen innovative Leichtbautechnologien sowie eine bessere Rückbau- und Recyclingfähigkeit im Fokus. Bei der Entwicklung von Speichertechnologien zielt die Ressourcenforschung auf die Substitution knapper und teurer Rohstoffe sowie möglichst effiziente Anschlussnutzungen („Second-life“, „Second-use“, „Re-use“).

Strukturen der FuE-Förderung

Die Energieforschung soll komplementär zu den laufenden Aktivitäten des BMBF-Rahmenprogramms *Forschung für Nachhaltige Entwicklung (FONA)*, hier insbesondere zu Rohstofftechnologien, Ressourceneffizienz und Recycling ausgerichtet werden.

Die zirkuläre Wirtschaft ist im EU Forschungsprogramm „Horizon 2020“ und im Nachfolgeprogramm „Horizon Europe 2021 – 2027“, im Förderprogramm *LIFE* sowie weiteren Förderprogrammen der European Investment Bank (EIB) und der EU-Strukturfonds (z. B. *INTERREG*) fest verankert.

4.4.4 CO₂-Technologien für die Energiewende

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

CO₂-Emissionen sind ein Haupttreiber des anthropogenen Klimawandels. In Deutschland entstehen CO₂-Emissionen überwiegend im Kontext der Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Öl und Gas. Die Reduktion von energiebedingten CO₂-Emissionen ist deshalb ein zentrales Ziel der Energiepolitik. Die Energieforschung adressiert dieses Ziel durch Steigerung der Energieeffizienz, die Integration erneuerbarer Energie in das Energiesystem sowie die Entwicklung alternativer industrieller Prozesse, die weniger oder keine Treibhausgasemissionen verursachen.

Im Bereich der Industrieprozesse werden zwei einander ergänzende Strategien verfolgt. Zum einen führt die Steigerung der Energieeffizienz durch den geringeren Energieeinsatz nachhaltig zur Senkung der energiebedingten CO₂-Emissionen im Industriesektor (siehe Kapitel 4.1.2). Andererseits werden für bestimmte Industrieprozesse, bei denen die Entstehung von CO₂ schwer oder gar nicht vermeidbar ist, Technologien zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs entwickelt. CO₂ kann beispielsweise in der chemischen Industrie als Ausgangspunkt für Grundstoffe verwendet werden (Umsetzung zu Polymeren, Grundchemikalien etc.). Es kann auch eingesetzt werden, um im Kontext der Sektorkopplung (siehe Kapitel 4.3.3) flüssige Kraft- und Brennstoffe herzustellen. Zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs werden Technologien zur Abscheidung von CO₂ aus Abgasen oder der Atmosphäre benötigt. Dies kann biologisch (Pflanzenwachstum) oder über technische Verfah-

ren erfolgen. CO₂-Technologien für Abscheidung, Transport, Speicherung und Verwendung von CO₂ sollen verstärkt erforscht werden, damit heimische Unternehmen und Forschungseinrichtungen eine Vorreiterrolle bei diesen auch für den Export relevanten Technologien einnehmen können.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Um den Ausbau von CO₂-Technologien im Kontext der Energiewende durch Forschungsförderung zu begleiten, sieht die Bundesregierung folgende strategisch wichtige FuE-Themen:

- Entwicklung CO₂-armer industrieller Prozesse
- skalierbare technologische Prozesse und wirtschaftliche Konzepte zur CO₂-Abscheidung (z. B. mit Hilfe von Gas-trennmembranen) bei industriellen Prozessen
- Modifizierung bereits entwickelter und Erschließung neuartiger CO₂-Abscheidetechnologien, Anlagen und Komponenten für den Einsatz an industriellen CO₂-Quellen (z. B. Produktionsprozesse für Stahl, Zement- und Kalkindustrie, Müllverbrennung)
- Betriebskonzepte und Flexibilität von CO₂-Infrastrukturen und Werkstoffvorschläge für unterschiedliche Einsatzbereiche
- robuste Verfahren und neuartige Katalysatoren mit hoher Flexibilität zur Umwandlung von CO₂ in Grundchemikalien, inkl. Demonstration einer kompletten CCU-Kette (CCU: Carbon Capture & Utilization). Dies betrifft insbesondere solche Prozesse, die zu einer Immobilisierung von CO₂ führen, beispielsweise in langlebigen Baustoffen und Produkten, gegebenenfalls durch mineralische Bindung (enhanced weathering)
- Die chemische Nutzung von CO₂ zur Herstellung von Grundchemikalien erfordert vor allem Forschungsarbeiten zu Synthese- und Katalysatoren-Entwicklungen, um den Reaktionsumsatz zu erhöhen, hohe Selektivitäten sowie Stabilität gegenüber Verunreinigungen zu erzielen.
- CO₂-Abscheidung direkt aus der Atmosphäre mittels technischer Systeme oder durch dauerhafte Bindung des in Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs
- die direkte Nutzung von CO₂ (z. B. CO₂ als Arbeitsmedium in ORC-Prozessen sowie in Kühlaggregaten und Klimaanlageanlagen oder als Wärmeträgermedium in Erdwärmesonden und geothermischen Anwendungen)
- die direkte elektrochemische CO₂-Umsetzung (z. B. Co-Elektrolyse) zu Wertstoffen
- Erforschung alternativer CO₂-Umsetzungsprozesse (z. B. plasmainduzierte Spaltung)
- Werkstoffentwicklung und -weiterentwicklung für unterschiedliche Einsatzbereiche und Komponenten (z. B. Pipelines, CO₂-Verdichter, CO₂-Abscheidungsverfahren, Co-Elektrolyse) sowie die Entwicklung von Transportalternativen zur Entwicklung einer umfassenden CO₂-Infrastruktur
- Identifizierung und Entwicklung nachhaltiger Technologien zur CO₂-Kreislaufwirtschaft

Strukturen der FuE-Förderung

Der Aufbau und Betrieb einer kompletten CCU-Kette von der CO₂-Abtrennung bis zur nachhaltigen CO₂-Nutzung wäre auch im Rahmen eines Reallabors sowie in den *Kopernikus-Projekten* denkbar. Dabei ist insbesondere auf eine Lebenszyklusanalyse des genutzten CO₂ zu achten. National unterstützt die Bundesregierung das *Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung*, das als Informations- und Diskussionsplattform für forschungspolitische Themen wie die CO₂-Technologien dient. Die Bundesregierung unterstützt weiterhin internationale FuE-Aktivitäten, etwa durch Kooperationen im Rahmen von ERA-Nets (z. B. ACT) des europäischen Forschungsrahmenprogramms.

4.4.5 Energiewende und Gesellschaft

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Der Empfehlung der Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ folgend, hat die Bundesregierung die Energiewende immer als Gemeinschaftswerk für die Zukunft verstanden und angelegt. Die notwendigen Veränderungen können nur durch die Mitwirkung aller gesellschaftlichen Akteure erfolgen. Bei einem Transformationsprozess wie

dem der Energiewende ist ein konstruktiver gesellschaftlicher Dialog entscheidend.

Die Wissenschaft trägt für die Umsetzung der Energiewende neben der Bereitstellung von Handlungs- und Orientierungswissen durch Forschung auch eine zunehmende Verantwortung für den Transformationsprozess selbst. Sie kann Lösungen anbieten, sich aber auch begleitend und beratend an der Umsetzung beteiligen, indem sie passende technische und soziale Innovationen gemeinsam mit Staat und Zivilgesellschaft voranbringt. Dabei müssen oft auch ethische Fragen zu den Folgen einzelner Technologien oder der Energiewende insgesamt mit bedacht werden. Gleichzeitig lassen sich aber nicht alle Fragen rein wissenschaftlich und objektiv beantworten, Wissenschaft kann den gesellschaftlichen Dialog und den demokratischen Prozess nicht ersetzen.

Daher sollte die Wissenschaft anstreben, im transdisziplinären Diskurs technologische Anforderungen und soziale Bedürfnisse zu untersuchen und Technikfolgen transparent zu vermitteln. Dabei kann sie laborhaft, d. h. unter realitätsnahen Bedingungen, mögliche Lösungen erproben und auf ihre sozialen wie ökonomischen Wirkungen hin überprüfen. In interdisziplinärer Zusammenarbeit ist die Wissenschaft gefragt, um vorausschauend gesellschaftliche und institutionelle Zielkonflikte zu identifizieren. Sie sollte Leitbilder und Agenden anbieten, die eine koordinierte und zielwirksame Umsetzung der Energiewende erlauben. Und sie kann durch ihre Beratungsangebote die Organisationen der Gesellschaft und des Markts dabei unterstützen, regulatorische und strukturelle Maßnahmen, Business Cases und Marktstrategien zu entwickeln, die den Markteintritt von Innovationen wirksam unterstützen. Hierzu gehört selbstverständlich auch Kommunikation und Transparenz der Wissenschaft. Die Forschenden verpflichten sich zu transparentem Vorgehen und aktiver Öffentlichkeitsarbeit, um über Fortschritte und Rückschläge zu berichten. Dabei sollte die Relevanz der eigenen Arbeit dargestellt, aber auch kritisch hinterfragt werden.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Eine gesellschaftsbezogene Energiewendeforschung muss eine Vielzahl von Handlungsfeldern einbeziehen.

Folgende Themen und Entwicklungen verdienen hierbei besondere Berücksichtigung:

- Eine wichtige Rolle spielen die Datenerhebung und die Erfassung der technischen, sozialen, ökonomischen und institutionellen Rahmenbedingungen, die Abschätzung und Beurteilung von Interventionsfolgen und die Ermittlung von Business Cases für Körperschaften und Unternehmen.
- Neue Instrumente der Datenverarbeitung, vielseitige und umfangreiche Datenmengen (Big Data) sowie der Datenaustausch in den sozialen Medien bilden ein weiteres, innovatives und Disziplinen übergreifendes Werkzeug zur Erfassung und Darstellung der Handlungsvoraussetzungen sowie zur Abschätzung möglicher Handlungsfolgen. Innovative digitale Instrumente wie Simulations-, Visualisierungs- und Kommunikationsformen sollen für die Planung und partizipative Optimierung von Energiewende-Maßnahmen zur Verfügung gestellt werden.
- Sich daraus ergebende, neue Formen der Information und Partizipation können bei der kollektiven, die Gesellschaft einbeziehenden Planung und bei der Identifizierung gerechter, konfliktarmer und breit akzeptierter Lösungen wesentliche Unterstützung leisten. Die fortgesetzte wissenschaftliche Methodenentwicklung trägt dazu bei, wirksame, den unterschiedlichen Akteurs- und Nutzergruppen entsprechende Partizipationsformen zu gestalten sowie Beteiligungserfolge messbar zu machen.
- Effiziente, klima- und ressourcenschonende Konsumgüter und Strategien zur Emissionsvermeidung, zu deren Entwicklung wissenschaftliche Forschung wesentliche Beiträge liefert, finden insbesondere dann Eingang in das Konsum- und Nutzungsverhalten der Bürger, wenn sie ihnen auch lebenspraktische Vorteile bieten. Verhaltensökonomische Experimente, Reallabore und Modellregionen können die bewährten, vor allem auf modellhaften Ableitungen und Befragungen basierenden Methoden sinnvoll ergänzen. Denn mit ihnen lassen

sich Bedarfslagen und Akzeptanzhemmnisse empirisch und experimentell ermitteln.

- Die Umsetzung der Energiewende erfordert Marktmechanismen und regulatorische Rahmenbedingungen, die die Potenziale innovativer Technologien und Geschäftsmodelle zum Tragen kommen lassen. Deren Erforschung und Konzeption muss übergreifend erfolgen, um die Auswirkungen über Sektorgrenzen hinweg zu berücksichtigen.
- Die Bundesregierung wird den Strukturwandel in den deutschen Braunkohlerevieren begleiten und konkrete Zukunftsperspektiven für die Zeit nach dem Kohleausstieg sicherstellen. Für die Energieforschung ergeben sich in diesem Kontext verstärkt sozio-ökonomische Forschungsbedarfe, um die wahrscheinlichen Folgen konkreter Maßnahmen besser bewerten zu können.

Strukturen der FuE-Förderung

Die Ergebnisse solch grundlagenorientierter Untersuchungen müssen mit Beteiligung aller relevanten Akteure entstehen und zielgruppenorientiert vermittelt werden. Studien, Stakeholder-Workshops, Leitfäden und Planungshilfsmittel können die anschließenden Planungs- und Entscheidungsprozesse unterstützen. Dazu zählt auch die laborhafte Erprobung von Maßnahmen der Energiewende im verhaltensökonomischen Experiment oder begleitend in Reallaboren und Modellregionen.

4.4.6 Materialforschung für die Energiewende

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Viele technologische Fortschritte waren historisch von Fortschritten der Materialforschung getrieben. Daher verlangt die Energiewende sozusagen nach „Energiermaterialien“ – neuen Materialien oder Varianten existierender Materialien mit erheblich verbesserten Eigenschaften. Dies lässt sich beispielsweise durch Funktionalisierung oder Strukturierung erreichen.

Materialforschung für die Energiewende muss dabei die Breite der möglichen Anwendungsfelder in den Bereichen

Energieeffizienz und Energieerzeugung, Netze und Speicher, CO₂-Technologien sowie veränderten Fertigungsprozessen und -techniken im Blick behalten. Die Forschung und Entwicklung im Labor wird dabei durch digitale Technologien der Simulation und Modellierung und der Mess- und Prüftechnik unterstützt. Sie führen zu einer Beschleunigung des Innovationsprozesses oder ermöglichen erst gewisse methodische Vorgehensweisen (z. B. ein umfassendes Screening für Materialdesign). Die Weiterentwicklung der Normierung und Standardisierung sollte die Herstellung neuer Materialien unterstützen. Darüber hinaus gilt es, Synergien zwischen unterschiedlichen Technologien in vergleichbaren Anwendungen zu erzeugen. Diese Ziele lassen sich nur durch transdisziplinäre, also Fachgrenzen überschreitende Forschung und gegebenenfalls internationale Kooperation erreichen.

Die Energiewende ist ein bereits stattfindender Prozess, weshalb vorrangig materialwissenschaftliche Fragestellungen mit hohem Anwendungspotenzial beantwortet werden müssen – also praxisnahe Lösungen, flankiert von Vorschlägen für den Transfer in die Praxis.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Wichtige generelle Forschungsthemen im Bereich der Materialforschung sind:

- die Senkung der Kosten für Energiematerialien
- die Verwendung von kostengünstigen, reichlich vorhandenen und zu vertretbaren Kosten verfügbaren Materialien und Rohstoffen sowie Recycling und Ressourceneffizienz (siehe Kapitel 4.4.3)
- die Substitution heute verwendeter seltener, umweltschädlicher oder energieintensiv herzustellender Materialien
- die Entwicklung energieeffizienter und zu den Materialien passender Fertigungsstrategien
- Erkenntnisgewinn über die zugrundeliegenden Mechanismen und Reaktionen von chemischen Prozessen (insbesondere Katalyse)

Folgende Forschungsbedarfe ergeben sich in den Anwendungsfeldern:

- Entwicklung und Verbesserung von Materialien zur Optimierung (von Anlagen) der Energieproduktion aus erneuerbaren Energiequellen, wie Photovoltaik, Solarthermie, Windenergie, Geothermie und Bioenergie
- Entwicklung und Verbesserung von Materialien für Energiespeicher und Energieübertragungsmedien wie neue Materialien und Konzepte für Hochleistungsbatteriesysteme, Superkondensatoren und Komponenten für Brennstoffzellen, Post-Li-Batterien, thermische Speicher der nächsten Generation (große thermische Speicherkapazitäten, isentrope Energiespeicherung), Elektrolyse, Energienetze etc.
- Entwicklung und Verbesserung von Materialien und Fertigungsverfahren zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie mit dem Ziel einer Substitution energieintensiver Verfahren bei Betrachtung der Gesamtenergiebilanz
- Anwendungen in den Bereichen Mobilität, Gebäude/Quartiere wie beispielsweise Hochleistungswärmedämmung, transparente Dämmsysteme, Batteriekomponenten, Leichtbauwerkstoffe, Wärme- und Kühlungsmanagement
- Entwicklung und Verbesserung von Materialien zur Ausrichtung des Betriebs fossiler Kraftwerke auf die Herausforderungen der Energiewende. Dazu zählen faserverstärkte Keramiken für Gasturbinen-Kraftwerke, Hochtemperaturmetalle und Beschichtungen, verbesserte Korrosionseigenschaften der Materialien sowie thermische und thermochemische Energiespeicher in Kraftwerken.

Mit diesen Zielen muss die Weiterentwicklung der jeweiligen Herstellungs- oder Syntheseprozesse, der Prozesse zur Ver- und Bearbeitung, die Erhöhung der Recyclingfähigkeit der entwickelten Materialien, von Simulation und Modellierung, Mess- und Prüftechnik sowie von Normierung und Standardisierung einhergehen.

Strukturen der FuE-Förderung

Innovative Materialien nehmen in nahezu allen Technologiebereichen mit Bezug zur Energie eine Schlüsselposition ein. Sie verbessern bestehende technische Lösungen und erschließen neue Funktionalitäten. Aus diesem Grund liefert die Materialforschung fundamentale Beiträge zu nahezu allen genannten Themen des Energieforschungsprogramms, insbesondere Energiewende in den Verbrauchssektoren (siehe Kapitel 4.1), Energieerzeugung (siehe Kapitel 4.2), Stromspeicher (siehe Kapitel 4.3.2), Ressourceneffizienz (siehe Kapitel 4.4.3) und CO₂-Technologien (siehe Kapitel 4.4.4).

Die Material-Roadmap, die die im Rahmen des SET-Plans entwickelten Technologie-Roadmaps ergänzt und erweitert, stellt wichtige Materialforschungs- und Innovationsaktivitäten vor, um Energietechnologien für die nächsten zehn Jahre voranzutreiben. Sie dient als pragmatischer Leitfaden für Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet der Materialien für Energieanwendungen und ist Grundlage für das Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union sowie die Programme der Mitgliedstaaten.

Die Bearbeitung materialwissenschaftlicher Fragestellungen im Rahmen von Nachwuchsgruppen hat sich als wegweisende Fördermaßnahme erwiesen und soll daher weiterhin eingesetzt werden. Gleichzeitig ist es zwingend erforderlich, dass die (weiter-) entwickelten Materialien und Prozesse schnell in die Anwendung überführt werden, z. B. mit Hilfe von Demonstrationsprojekten.

Die Materialforschung ist aufgrund ihrer universell einsetzbaren Ergebnisse sehr international organisiert. Daher wird die internationale Kooperation in Form bi- oder multilateraler Forschungsverbünde durch die Verzahnung von nationalen Maßnahmen mit Programmen anderer EU-Mitgliedstaaten oder Nicht-EU-Staaten weiter ausgebaut. Im Rahmen von Mission Innovation treibt die *Clean Energy Materials Innovation Challenge* die Materialforschung für die Energiewende voran.



4.5 Nukleare Sicherheitsforschung

Energiewirtschaftliche Einordnung und strategische Ziele der FuE-Förderung

Deutschland wird zum Ablauf des Jahres 2022 die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung beenden. Für den sicheren restlichen Leistungsbetrieb sowie den anschließenden mehrjährigen Stilllegungsbetrieb bleibt eine kontinuierliche technisch-wissenschaftliche Begleitung auf höchstem Niveau sowie der Erhalt der notwendigen nationalen Expertise auch für die Mitwirkung in nationalen und internationalen Gremien unbedingt erforderlich. Dies schließt ausreichende Personalressourcen mit ein.

Mit Blick über die deutschen Grenzen hinaus tragen heute und auch in absehbarer Zeit Kernkraftwerke (KKW) weltweit zur Versorgung mit elektrischer Energie bei. Angesichts des möglichen grenzüberschreitenden Charakters der Betriebsrisiken liegt es auch langfristig im deutschen Sicherheitsinteresse, die Entwicklungen im benachbarten Ausland hinsichtlich bestehender und geplanter Anlagen auch aus fachlicher Sicht verfolgen zu können.

Darüber hinaus besteht eine langfristige Verantwortung für die sichere Entsorgung der bestrahlten Brennelemente und radioaktiven Abfälle mit einem Zeithorizont weit über den Betrieb der deutschen KKW hinaus. In der 18. Legislaturperiode hat der Gesetzgeber Maßnahmen zur Fortent-

wicklung des rechtlichen, organisatorischen und finanziellen Rahmens für die nukleare Entsorgung beschlossen. Sie stellen die deutsche Entsorgungsforschung vor neue, die bisherigen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erweiternde Herausforderungen.

Das Atomgesetz (AtG) bindet die Genehmigung kerntechnischer Anlagen an Sicherheitsvorgaben gemäß dem fortschreitenden Stand von Wissenschaft und Technik. Bei der Fortschreibung des Standes von Wissenschaft und Technik kommt der staatlichen nuklearen Sicherheits- und Entsorgungsforschung eine herausragende Rolle zu. Dies gilt für Betrieb, Stilllegung und Rückbau von KKW und Forschungsreaktoren ebenso wie für die Zwischenlagerung und Entsorgung radioaktiver Abfälle. Darüber hinaus bestehen internationale Verpflichtungen gegenüber der Europäischen Union (Euratom) und der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) in den Bereichen der nuklearen Sicherheit und Entsorgung.

Die kontinuierlich staatlich geförderte nukleare Sicherheits- und Entsorgungsforschung ist für Erhalt und Ausbau von technisch-wissenschaftlicher Kompetenz langfristig essenziell. Sie gewährleistet die unabhängige Prüfung, Bewertung und Weiterentwicklung nationaler und internationaler Sicherheits- und Entsorgungskonzepte. Der perspektivische Erhalt von Fachwissen und -personal für

Sicherheitsfragen, die für den Betrieb und Rückbau kern-technischer Anlagen, für die Zwischen- und Endlagerung sowie für Strahlenschutz und Strahlenforschung zu beantworten sind, ist unverzichtbar. Dies soll den dauerhaften Einfluss Deutschlands auf die Reaktorsicherheit, die Sicherheit der Entsorgung und die Regelungen zum Strahlenschutz in Europa und weltweit gewährleisten. Diese Zielsetzung wird durch eine von Betreiberinteressen unabhängige institutionelle und projektgeförderte Forschung unterstützt, einschließlich unmittelbar nachwuchsorientierter Fördervorhaben. Die Projektförderung ist hierbei komplementär zur langfristig angelegten institutionellen Förderung der HGF und kann dort vorhandene, großforschungsspezifische Experimentiereinrichtungen und entsprechende Infrastrukturen ebenfalls nutzen.

4.5.1 Reaktorsicherheitsforschung

Mit ihren Fördermaßnahmen hat die Bundesregierung in den vergangenen Jahrzehnten entscheidend dazu beigetragen, dass der Betrieb deutscher Reaktoren anerkanntermaßen zu den weltweit sichersten gehört. Ergebnisse solcher Forschungsarbeiten haben vielfach Anstöße für eine weitere Verbesserung der Sicherheitstechnik und -kultur sowohl im In- als auch im Ausland gegeben.

Ausgehend von der bereits im Jahr 1998 erfolgten politischen Grundsatzentscheidung, die Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung schnellstmöglich zu beenden, wurden durch die von der Bundesregierung einberufene Evaluierungskommission „Nukleare Sicherheits- und Endlagerforschung“ Empfehlungen zur Prioritätensetzung und zur Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen ausgesprochen. Sie resultierten in der Gründung des *Kompetenzverbundes Kerntechnik* und werden seitdem regelmäßig fortgeschrieben. Die letztmalige Fortschreibung durch den Kompetenzverbund erfolgte im Jahr 2013. Dabei wurde eine Neuorientierung infolge des beschleunigten Ausstiegs vorgenommen, ausgelöst durch die Reaktorhavarien im japanischen KKW Fukushima-Daiichi.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Mit ihren Fördermaßnahmen verfolgt die Bundesregierung sich ergänzende strategische Ziele:

- technisch-wissenschaftliche Absicherung des verbleibenden Leistungsbetriebs deutscher KKW und Forschungsreaktoren sowie des sich daran anschließenden mehrjährigen Stilllegungsbetriebs
- Erhalt und Ausbau sicherheitstechnischer Kompetenz zur Beurteilung und Weiterentwicklung der Sicherheit nuklearer Anlagen im Ausland einschließlich neuer Reaktorkonzepte, die sich international in Entwicklung befinden und deren sicherheitstechnische Konzeption sich von den in Deutschland betriebenen Anlagen unterscheidet
- Einsatz von Methoden und Werkzeugen der Reaktorsicherheitsforschung für die Untersuchung ausgewählter Fragestellungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle, insbesondere im Zusammenhang mit der verlängerten Zwischenlagerung (z. B. Langzeitverhalten bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle) und einschließlich alternativer Entsorgungsstrategien sowie im Ausland verfolgter Entsorgungsstrategien (siehe Kapitel 4.5.2)
- Leistung eines substanziellen Beitrags zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und der Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Sicherheitsforschung in Deutschland

Zu den künftig zu bearbeitenden Themen der Reaktorsicherheitsforschung, die auch im internationalen Kontext (u. a. Euratom, OECD/NEA) verfolgt werden, gehören insbesondere:

- realistische, detaillierte Beschreibungen der Abläufe im Reaktorkern, in den Kühlkreisläufen und im Sicherheitsbehälter bei Leistungs- und Stilllegungsbetrieb sowie bei Stör- und Unfällen, Ableitung von Maßnahmen zur Beherrschung auch schwerer Störfälle;
- werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen zu Strukturmaterialien, Komponenten und Werkstoffen, insbesondere zu Alterung und Integrität, Verfahren zur Werkstoffcharakterisierung und zerstörungsfreier Prüfung;
- strukturmechanische Analysemethoden zur Integritätsbewertung von Gebäudestrukturen und Komponenten;
- sicherheitsrelevante Einflüsse menschlichen Handelns sowie der Organisation;

- probabilistische Methoden zur Verbesserung der Werkzeuge für die Identifizierung relativer Schwachstellen in Anlagenauslegung und Prozessführung;
- Sicherheitsfragen hinsichtlich innovativer Sicherheitssysteme und digitaler Leittechnik.

4.5.2 Entsorgungs- und Endlagerforschung

Mit der Endlagerforschung wurde in Deutschland seit mehr als 50 Jahren eine ausgezeichnete, international anerkannte wissenschaftliche Expertise zur Entsorgung radioaktiver Abfälle aufgebaut. Die Standortauswahl in Deutschland mit der gleichwertigen, ergebnisoffenen Betrachtung aller Wirtsgesteine stellt neue Herausforderungen an die nukleare Entsorgungsforschung. Die Entsorgungsforschung umfasst neben der Endlagerung in tiefen geologischen Formationen auch spezifische Maßnahmen im Vorfeld sowie Untersuchungen zu den Auswirkungen der absehbar deutlich verlängerten Zwischenlagerzeiten auf Abfälle und Behälter. Dies betrifft auch die Folgen für die letztlich zu realisierende Endlagerung der radioaktiven Abfälle. Neben der direkten Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sind alternative Optionen für eine sichere Entsorgung und gegebenenfalls deren technische Umsetzbarkeit zu prüfen.

Die in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführten Fördermaßnahmen der Bundesregierung haben wesentlich dazu beigetragen, die wissenschaftlich-technischen Grundlagen für zukünftige Endlagerkonzepte und Sicherheitsnachweise zu schaffen. Deutschland verfügt über eine thematisch umfassende und gut abgesicherte wissenschaftliche Basis sowie international hoch anerkannte Forschungsstellen auf dem Gebiet der nuklearen Entsorgung. Hierzu trägt die konsequente Beobachtung und Mitgestaltung relevanter Entwicklungen im Ausland im Zuge der internationalen Kooperation bei.

Diese unabhängige, breit angelegte, nationale und im Zuge internationaler Kooperation realisierte Forschungs- und Entwicklungstätigkeit sichert als Vorsorgeforschung, unabhängig von den im Standortauswahlverfahren beteiligten Institutionen, die kontinuierliche Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen für die Entsorgung radioaktiver Abfälle und damit des Standes von Wissenschaft und Technik in Deutschland. Durch interdisziplinäre Erfor-

schung der technischen, gesellschaftlichen und prozeduralen Aspekte der Entsorgung wird das Verständnis für die komplexen Zusammenhänge, die mit den Standortauswahlverfahren und Entsorgungskonzept verbunden sind, gestärkt.

Strategisch wichtige FuE-Themen

Die Ziele und Strategien der Projektförderung zur Entsorgungsforschung sind im Förderkonzept des BMWi „Forschung zur Entsorgung radioaktiver Abfälle“ detailliert dargestellt und werden regelmäßig unter Beteiligung von unabhängigen Sachverständigen überprüft und weiterentwickelt.

Mit ihren Fördermaßnahmen verfolgt die Bundesregierung sich ergänzende strategische Ziele:

- Schaffung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen zur Realisierung eines Endlagers insbesondere für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle
- Schaffung einer erweiterten, fundierten Wissens- und Entscheidungsbasis durch Untersuchungen zu alternativen Entsorgungsstrategien und zu im Ausland präferierten Entsorgungsoptionen
- Entwicklung erforderlicher Methoden und Techniken für spezifische Maßnahmen zur Vorbereitung der Endlagerung, insbesondere im Hinblick auf die Wirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten, z. B. auf Abfälle und Behälter, sowie für Konzeption, Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers, verbunden mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik
- Leistung eines substanziellen Beitrags zu Aufbau, Weiterentwicklung und Erhalt der wissenschaftlich-technischen Kompetenz und zur Nachwuchsförderung im Bereich der nuklearen Entsorgung in Deutschland

Zu den künftig zu bearbeitenden Themen der Entsorgungsforschung, die auch im internationalen Kontext (u. a. im Rahmen von Euratom, *European Joint Programming; Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform*, IGD-TP; OECD/NEA) verfolgt werden, gehören insbesondere:

- Fortentwicklung der Instrumente und Methodik für den Sicherheitsnachweis („Safety Case“)
- vertiefte Untersuchungen zu Systemverhalten und -entwicklung sowie zu technischer Machbarkeit und Langzeitverhalten von Endlagerkomponenten
- Maßnahmen zur Gewährleistung der Betriebssicherheit sowie zum Monitoring des Endlagersystems und seines Umfelds
- Auswirkungen verlängerter Zwischenlagerzeiten auf abgebrannte Brennelemente, radioaktive Abfälle und deren Lagerbehälter im Zusammenhang mit der endlagergerechten Konditionierung und den erforderlichen Transporten
- Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen für die Standortauswahl eines Endlagers sowie Untersuchungen zu alternativen Entsorgungsmethoden anstelle der direkten Endlagerung in einem Bergwerk
- Einbeziehung sozio-technischer Fragestellungen sowie Betrachtung inter- und transdisziplinärer Ansätze, Fragen der Governance sowie die Einbindung von interessierter Öffentlichkeit und Politik
- Entwicklung von Konzepten, Methoden und Techniken zur Kernmaterialüberwachung („Safeguards“)

4.5.3 Strahlenforschung

Die geänderten politischen Randbedingungen durch das Standortauswahlgesetz, die verlängerte Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle und der insgesamt verlängerte Zeithorizont bis zur Identifizierung geeigneter Lagerstätten und sicheren Endlagerung generieren auch neue Anforderungen an die Strahlenforschung.

Die in diesem Rahmen durchgeführten Untersuchungen zu den Auswirkungen und den Folgen insbesondere niedriger Strahlenexpositionen auf Mensch und Umwelt schaffen die Grundlage für einen an dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik orientierten Strahlenschutz. Strahlenforschung ist von zentraler Bedeutung für die Risikobewertung und den vorbeugenden Schutz sowohl im Bereich Rückbau und Entsorgung als auch bei den übrigen natürlichen wie zivilisatorischen Strahlenbelastungen im Alltag,

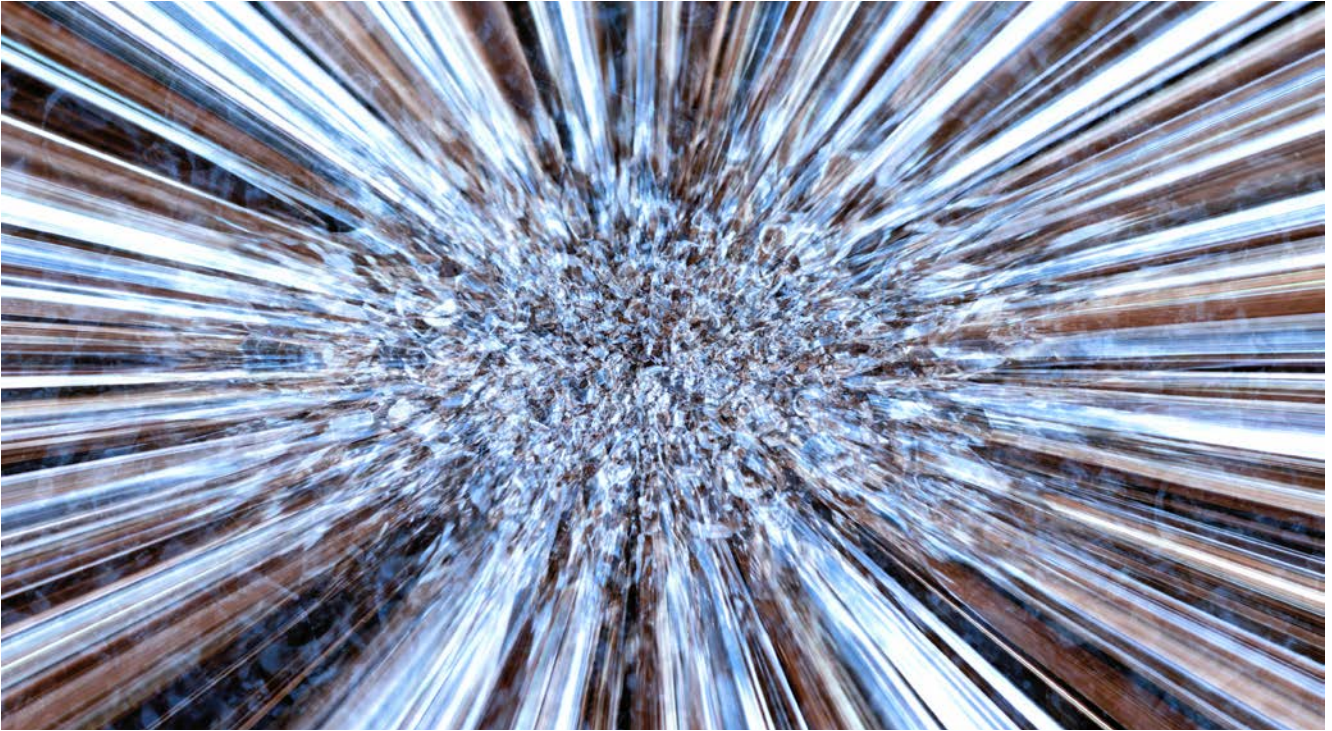
z. B. durch Radon oder UV-Strahlung, in der Medizin oder bei Flugreisen.

Im Mittelpunkt der Projektförderung zu biologischen, biogeochemischen, medizinischen und radioökologischen Fragestellungen stehen neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn vor allem eine systematische Nachwuchsförderung und der Kompetenzerhalt. Ziel ist es, die inhaltliche Breite, wissenschaftliche Leistungsfähigkeit und internationale Konkurrenzfähigkeit der deutschen Strahlenforschung zu gewährleisten und den infolge der Rückbau- und Entsorgungsaktivitäten absehbar zunehmenden Bedarf an hochqualifizierten Strahlenschutzexpertinnen und -experten in Behörden und Unternehmen zu decken. Hierzu werden zentrale Forschungsfragen von gesamtgesellschaftlicher Bedeutung durch inter- bzw. transdisziplinär ausgerichtete Forschungsverbünde, beispielsweise zur Wirkung geringer Strahlendosen, adressiert.

Dabei kann auf die gezielte Förderung der Strahlenforschung in der letzten Dekade aufgebaut werden. So konnten hochkompetente Forschungsverbünde aufgebaut und neue Themenbereiche wie Molekulare Epidemiologie, Systembiologie, Radioimmunologie und Molekulares Targeting adressiert werden.

Die künftig zu bearbeitenden Forschungsthemen werden insbesondere in den folgenden Bereichen angesiedelt sein:

- **Strahlenepidemiologie und Strahlenrisiken**
Ziel ist u. a. die Erforschung von Mechanismen der strahlenbedingten Entstehung von Krebserkrankungen, die Identifizierung spezifischer Biomarker zum Verständnis radiologischer Wirkungsmodelle.
- **Strahlenschutz und Dosimetrie**
Untersuchung, Erfassung und Bewertung niedriger Strahlendosen.
- **Radioökologie**
Vertiefte Untersuchung des Verhaltens von Radionukliden in der Nahrungskette und spezifischer Transportwege sowie der Verwitterung kontaminierter Materials.
- **Strahlenbiologie**
Aufklärung zellulärer und molekularer Wirkungsmechanismen, aus denen gegebenenfalls neue therapeutische Ansätze abgeleitet werden können.



4.6 Leitfaden für die Projektförderung

Die Projektförderung richtet sich an Unternehmen, Forschungsinstitute und Universitäten. Sie erfolgt in Form von Zuwendungen für Forschungs-, Entwicklungs-, und Innovations- und Demonstrationsvorhaben sowie Modellprojekte und Reallabore. Die Richtgröße für die Zuordnung der FuEuI-Förderung ist damit das im Vorhaben angestrebte TRL, d.h. der Technologiereifegrad bei Projektende. Für Vorhaben im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms umfasst der Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung die TRL 1-3, der Bereich der Angewandten Energieforschung die TRL 3-7. Förderaktivitäten im Rahmen von Modellprojekten und Reallaboren können bis in die TRL 8 und 9 hineinreichen.

Die Projektförderung ist ein Instrument zur Unterstützung thematisch abgegrenzter und zeitlich befristeter Vorhaben mit hohem Risiko und von bundesweitem Interesse. Sie wird nur in den Fällen eingesetzt, in denen der Markt in absehbarer Zeit die neuen technischen Entwicklungen nicht von selbst erbringen kann oder übergreifende wissenschaftliche Untersuchungen von besonderem gesellschaftlichen Interesse sind.

Die Projektförderung erfolgt häufig in Form der Verbundforschung, in der Hochschulen und Forschungsinstitute im Verbund mit Unternehmen arbeitsteilig und wettbewerbsfähig zusammenarbeiten.

Voraussetzungen

Dieser Leitfaden soll einen ersten Überblick über die Rahmenbedingungen der Förderung geben. Genauere Einzelheiten zu den Fördermodalitäten werden in ressortspezifischen Förderrichtlinien und Förderbekanntmachungen veröffentlicht, die sicherstellen, dass die Fördermittel im Bundesinteresse und nach den gesetzlichen und ressortspezifischen Vorgaben verwendet werden.

Das 7. Energieforschungsprogramm beschreibt die förderfähigen Themen, formuliert die Grundzüge der Förderpolitik und ist die Basis für Förderentscheidungen.

Die Zuständigkeit für die Projektförderung von Forschung, Entwicklung und Innovation im Energiebereich liegt bei den beteiligten Ministerien (BMWi, BMEL, BMBF), die im Rahmen ihrer Zuständigkeit jeweils Förderrichtlinien dazu publizieren. Die Bundesministerien werden bei der Durchführung durch so genannte Projektträger unterstützt.

Die Projektträger prüfen im Auftrag des zuständigen Ressorts jede Projektskizze und jeden Förderantrag auf Passfähigkeit zum Programm, seinen Innovationsgehalt, Plausibilität und Durchführbarkeit, Angemessenheit der Fördersumme, aber auch die fachliche Kompetenz und Bonität des Antragstellers. Darüber hinaus bewerten sie den mög-

lichen Beitrag, den das Vorhaben zu den förderpolitischen Zielen des Energieforschungsprogramms leisten kann. Wenn sinnvoll, werden dazu Gutachter oder Gutachtergremien hinzugezogen. Sind diese Kriterien in allen Punkten in ausreichendem Maße erfüllt, so kann das beantragte Vorhaben i.d.R. zur Förderung empfohlen werden. Die endgültige Förderentscheidung trifft das zuständige Bundesressort (Zuwendungsgeber) nach pflichtgemäßem Ermessen im Rahmen der verfügbaren Haushaltsmittel. Ein Rechtsanspruch auf Förderung besteht nicht.

Antragsberechtigt sind im europäischen Wirtschaftsraum produzierende Unternehmen – insbesondere KMU, Hochschulen sowie in Deutschland ansässige außeruniversitäre Forschungseinrichtungen und andere Institutionen oder juristische Personen. Das Vorhaben soll in der Regel im europäischen Wirtschaftsraum durchgeführt und verwertet werden. Ferner müssen Antragsteller grundsätzlich einen Eigenanteil tragen und diesen bei der Antragstellung ausweisen.

Ressortübergreifende Förderinitiativen

Als besonderen Beitrag zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele sieht das vorliegende Energieforschungsprogramm der Bundesregierung die Stärkung thematisch übergreifender und systemorientierter Forschungsansätze in Bereichen mit besonderer Relevanz für die Energiewende vor. Dazu werden ressort- und programmübergreifende Forschungsinitiativen wie zum Beispiel „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ oder „Energiewende im Verkehr: Sektorkopplung durch die Nutzung strombasierter Kraftstoffe“ durchgeführt. Weitere Förderschwerpunkte für eine ressortübergreifende Zusammenarbeit sind denkbar.

Die gemeinsamen Förderinitiativen zeichnen sich durch ein breites Themenspektrum, hohe Komplexität und durch Fragestellungen aus, die eine intensive Zusammenarbeit von Grundlagenforschung, angewandter Forschung und technologischer Entwicklung für eine erfolgreiche Abwicklung der Maßnahme erfordern.

Aus diesem Grund ist für die konkrete Umsetzung jeweils ein zentrales Programmmanagement vorgesehen. Ein Element des Programmmanagements ist eine gemeinsame Anlaufstelle. Sie beantwortet erste fördertechnische Anfragen und nimmt alle Projektideen entgegen. Dies gilt auch für umfassende Förderinitiativen in Form von Reallaboren sowie für ausgewiesene Zielgruppen der Förderung wie beispielsweise junge und innovative Unternehmen bzw. Startups.

Generell werden die eingehenden Projektskizzen entsprechend den vorgeschlagenen Themen den beteiligten Ressorts und den jeweiligen Fördertiteln zugeordnet. Die konkrete Bearbeitung der förmlichen Förderanträge erfolgt in der zweiten Stufe des Verfahrens bei den Projektträgern. Hierdurch vereinfacht sich das Verfahren für den Antragsteller und die Gefahr von Doppelförderung kann bereits in einer frühen Phase des Prozesses vermieden werden.

Finanzielle Modalitäten der Projektförderung

Die Förderung erfolgt durch Zuwendungen. Die Rechtsgrundlage dafür bildet die Bundeshaushaltsordnung (BHO) zusammen mit den Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zur Bundeshaushaltsordnung (VV BHO), in denen die Voraussetzungen und Verfahrensabläufe geregelt sind. Zudem ist das EU-Beihilfenrecht und insbesondere die Allgemeine Gruppenfreistellungsverordnung (EU) Nr. 651/2014 in der aktuellen Fassung und der Unionsrahmen für staatliche Beihilfen zur Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation zu berücksichtigen.

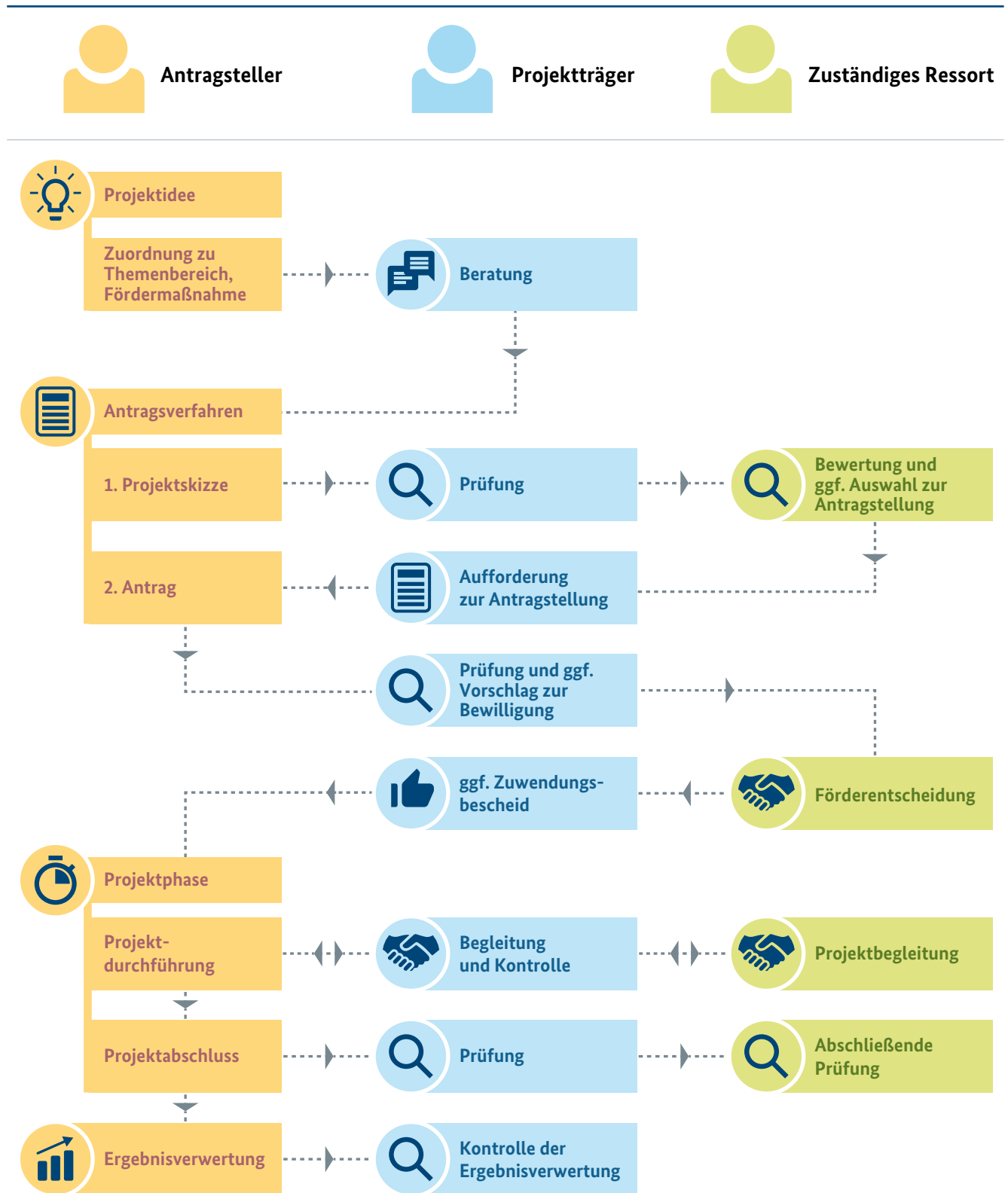
Die Zuwendungen werden in Form von Teilfinanzierungen zur Anteils-, Fehlbedarfs- oder Festbetragsfinanzierung oder – in Ausnahmefällen – auch zur Vollfinanzierung eines Projekts gewährt.

Bei Antragstellern aus öffentlichen Einrichtungen sind grundsätzlich die Projektausgaben Bemessungsgrundlage für die Höhe der Förderung. Bei Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft bilden die Projektkosten einschließlich der Gemeinkosten die Basis für die Förderung.

Die Förderquoten können maximal die durch die Allgemeine Gruppenfreistellungsverordnung bzw. den Unionsrahmen für staatliche Beihilfen für Forschung, Entwicklung und Innovation der Europäischen Kommission vorgegebene Höhe annehmen, die z. B. bei anwendungsorientierten Projekten, wie sie in der Regel von Industrieunternehmen durchgeführt werden, 50 Prozent der Kosten beträgt. Universitäten können mit einer Förderquote bis zu 100 Prozent unterstützt werden.

Ausschlaggebend für die Höhe der Förderquote sind einerseits die beihilferechtlichen Vorgaben sowie andererseits, nach dem Grundsatz des wirtschaftlichen und sparsamen Umgangs mit öffentlichen Mitteln, auch das technisch-wissenschaftliche Risiko sowie das Bundesinteresse, das dem Vorhaben beigemessen wird.

Abb. 12: Prozesse der Projektförderung



Durchführung eines Projekts

Ein besonderes Anliegen der Bundesregierung ist es, Antragsteller ausführlich und kompetent über die Fördermöglichkeiten im Rahmen des Energieforschungsprogramms zu beraten. Eine erste Adresse für diese Beratung sind die Projektträger, die im Auftrag der jeweils zuständigen Ministerien mit der Umsetzung und Durchführung dieses Forschungsprogramms beauftragt sind.

Die Projektträger betreuen und begleiten die Projekte sowohl fachlich als auch administrativ – beginnend mit der ersten Kontaktaufnahme des Antragstellers, über die Beratung bei Antragstellung, die Antragsprüfung, die Vorbereitung der Förderentscheidung, die fachliche und administrative Begleitung des laufenden Projekts und die Erfolgskontrolle bis zur Verwertung der Ergebnisse. Der Verlauf eines erfolgreichen Projekts von der Idee bis zur Ergebnisverwertung ist in Abb. 12 schematisch dargestellt.

Ergebnisverwertung

Notwendige Voraussetzung für den Erfolg eines Projekts ist die Sicherstellung der bestmöglichen Verwertung der Ergebnisse. Die Förderrichtlinien sehen deshalb bereits bei Antragstellung eine genaue Darlegung der späteren Ergebnisverwertung in Form eines Verwertungsplans vor. Der Projektdurchführende ist verpflichtet, eine Umsetzung dieses Verwertungsplans anzustreben. Als Gegenleistung erhält er die Rechte an der ausschließlichen Nutzung der Ergebnisse. Allerdings muss er bei Forschungsprojekten, bei denen eine gewerbliche Nutzung zu erwarten ist, gewährleisten, dass die erzielten Ergebnisse schutzrechtlich gesichert werden. Denn es liegt im besonderen Interesse der Projektförderung, dass patentfähiges neues Wissen nach Möglichkeit zur Patentierung angemeldet wird. Die damit verbundenen Kosten sind bei kleinen und mittelständischen Unternehmen und öffentlichen Forschungseinrichtungen förderfähig. Darüber hinaus besteht eine generelle Veröffentlichungspflicht in Form von Konferenz- und/oder Fachliteraturbeiträgen. Der Praxistransfer sollte auch anderweitig unterstützt werden, beispielsweise durch Engagement in den *Forschungsnetzwerken Energie*.

Liste der Projektträger

Änderungen während der Programmlaufzeit sind vorbehalten, da Projektträgerschaften in der Regel ausgeschrieben werden.

Energietechnologien einschl. Grundlagenforschung

Projektträger Jülich (PtJ) – Geschäftsbereich Energie
Grundlagenforschung (EGF)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
Tel.: 02461 61-3547, Fax: 02461 61-2880
PTJ-EGF-7EFP@fz-juelich.de, www.ptj.de

Projektträger Jülich (PtJ) – Geschäftsbereiche Energiesystem (ESI, ESN, ESE)
Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich
Tel.: 02461 61-1999, Fax: 02461 61-2690
PTJ-ESX-7EFP@fz-juelich.de, www.ptj.de

Nukleare Sicherheitsforschung
Reaktorsicherheitsforschung (BMWi)
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
GmbH – Bereich Projektträger
Postfach 10 15 64, 50455 Köln
Tel.: 0221 2068-720, Fax: 0221 2068-629
projekttraeger@grs.de, www.grs.de

Nukleare Entsorgungsforschung (BMWi), Nukleare Sicherheitsforschung und Strahlenforschung (BMBF)
Projektträger Karlsruhe (PTKA) – Bereich Wassertechnologie und Entsorgung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-25790, Fax: 0721 608-925790
info@ptka.kit.edu, www.ptka.kit.edu

Bioenergie
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
Hofplatz 1, 18276 Gülzow
Tel.: 03843 6930-0, Fax: 03843 6930-102
info@fnr.de, www.fnr.de



5. Institutionelle Förderung

5.1 Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren

5.1.1 Der Forschungsbereich Energie in der HGF

Die Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. (HGF) unterscheidet sich von anderen institutionell geförderten Forschungseinrichtungen durch die Einbettung ihrer Forschungsarbeiten in die Programmorientierte Förderung (POF). Mit diesem Instrument werden die Ressourcen der einzelnen Forschungszentren gebündelt und auf langfristige Forschungsziele des Staates und der Gesellschaft ausgerichtet. In sechs Forschungsbereichen, darunter auch im Forschungsbereich Energie, bearbeitet die HGF große und drängende Fragen von Gesellschaft, Wissenschaft und Wirtschaft mit dem Ziel, die Lebensgrundlagen des Menschen zu erhalten und zu verbessern. Bundesmittel der institutionellen Förderung für den Forschungsbereich Energie der HGF werden dem 7. Energieforschungsprogramm zugeordnet. Die Finanzierung der Helmholtz-Zentren erfolgt zu 90 Prozent durch den Bund und zu 10 Prozent durch das jeweilige Sitzland.

Der Übergang (von der laufenden dritten) zur vierten Periode der Programmorientierten Förderung (POF-IV) ist für 2021 geplant. Anfang 2018 wurde die wissenschaftliche Arbeit des Forschungsbereichs Energie im Rahmen von POF-III einer umfassenden wissenschaftlichen Evaluierung unterzogen. Ähnliche Begutachtungen fanden auch in den anderen Forschungsbereichen statt. Insgesamt haben rund 600 international renommierte Experten in 32 Vor-Ort-Begutachtungen die wissenschaftliche Arbeit in der HGF im internationalen Vergleich und im Hinblick auf die POF-III-Programme bewertet. Die resultierenden Programm-Evaluationsberichte bilden zusammen mit dem 7. Energieforschungsprogramm eine wichtige Grundlage für die Erstellung forschungspolitischer Ziele für die von der HGF betriebene Energieforschung der kommenden Jahre. Zusammen mit diesen Zielen bilden die Programm-Evaluationsberichte auch die Grundlage für die POF-IV Programmanträge im Forschungsbereich Energie. Die Programmanträge sollen voraussichtlich Ende 2019 einer strategischen Bewertung unterzogen werden. Diese bildet wiederum die Basis für Finanzierungsempfehlungen für die neue POF-Periode.

Das 7. Energieforschungsprogramm schafft für diese komplexen Prozesse einen Rahmen und eine strategische Grundlage.

5.1.2 Inhalte und Strukturen des Forschungsbereichs Energie

Der Forschungsbereich Energie der HGF adressiert die großen Herausforderungen der Energiepolitik (siehe Kapitel 2). Die wissenschaftliche Arbeit im Forschungsbereich Energie soll konkrete Beiträge zum Gelingen der Energiewende (national und global) anstreben – unabhängig davon, ob es sich um grundlagenorientierte oder anwendungsnahe Forschung handelt. Ein klarer Bezug zu einer Anwendung im Energiebereich muss auch bei grundlagenorientierter Forschung im Forschungsbereich Energie gegeben sein (anwendungsorientierte Grundlagenforschung).

Mit Ausnahme der Fusionsforschung (siehe Kapitel 5.1.3), die aufgrund ihres Langfrist- und Grundlagencharakters in der Projektförderung derzeit nicht adressiert wird, soll sich die institutionell geförderte Forschung im Forschungsbereich Energie der HGF deshalb an den Themen der Projektförderung ausrichten (siehe Kapitel 4). Im Rahmen der institutionellen Förderung aufgebaute Kompetenzen und Infrastrukturen können und sollen wichtige Beiträge zu Verbundvorhaben der Projektförderung des Bundes leisten. Daneben sind die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Forschungsbereichs Energie angehalten, sich aktiv in die *Forschungsnetzwerke Energie* einzubringen und zur weiteren Vernetzung der Energieforschung beizutragen.

Die strukturelle Abgrenzung zur Projektförderung basiert im Wesentlichen darauf, dass die institutionelle Förderung Kompetenz und strategische Ausrichtung der deutschen Forschungslandschaft langfristig sicherstellt. Demgegenüber fokussiert die zeitlich befristete Projektförderung flexibel auf aktuelle Forschungsbedarfe und setzt vor allem kurz- und mittelfristig forschungspolitische Akzente. Daraus resultieren für den Forschungsbereich Energie der HGF zwei Alleinstellungsmerkmale: Erstens große und langfristig angelegte Forschungsinfrastrukturen und zweitens Systemkompetenz durch die Breite der in einer Pro-

grammstruktur gebündelten Expertisen. Im Forschungsbereich Energie sollen daher vor allem solche wissenschaftliche Fragen adressiert werden, für deren Bearbeitung die HGF auf Grund der genannten Alleinstellungsmerkmale und ihrer sonstigen Kompetenzen besonders geeignet ist.

Die institutionelle Förderung ist das geeignete Mittel, um große Forschungsinfrastrukturen langfristig zu finanzieren und nachhaltig zu betreiben. Eine primäre Aufgabe der am Forschungsbereich Energie beteiligten HGF-Zentren ist es daher, solche Forschungsinfrastrukturen zu entwickeln, zu unterhalten und für eigene Forschungsarbeiten zu nutzen sowie externen Nutzern aus Wissenschaft und Wirtschaft zur Verfügung zu stellen und damit wesentlich zur Leistungsfähigkeit des deutschen Wissenschafts- und Wirtschaftsstandorts beizutragen. Mit diesen oft weltweit einmaligen Forschungsinfrastrukturen werden die Helmholtz-Zentren zu attraktiven Partnern für Forschungsinstitute aus aller Welt, aber auch für die Universitäten im regionalen und nationalen Umfeld sowie für Wirtschaft und Industrie.

Die Zuwendungsgeber begleiten die stetige Weiterentwicklung des Forschungsbereichs Energie sowie der HGF insgesamt. Dies geschieht künftig im Rahmen der im Jahr 2017 entwickelten neuen Governance-Struktur. Auf Ebene der Forschungsbereiche wird es in Zukunft drei Gremien geben. Das *Management Board* dient als Kommunikations-, Informations- und Strategieplattform für die am Forschungsbereich Energie beteiligten Zentren. In der *Forschungsbereichsplattform* beraten und entscheiden die Zentren und die Zuwendungsgeber im Konsens über forschungsbereichsspezifische Aufgaben. Ein *Strategischer Beirat* schafft eine unabhängige, externe wissenschaftliche Beratung für den Forschungsbereich. Die Verfahren sind insgesamt auf Konsens ausgelegt und passen somit gut zur langfristig angelegten Forschung im Forschungsbereich Energie der HGF. Im Gegensatz dazu können in der Projektförderung kurzfristig neue forschungs- und energiepolitische Weichenstellungen vorgenommen werden.

Auch wenn die institutionelle Förderung langfristig angelegt ist, bedarf es geeigneter Flexibilisierungsinstrumente, um in einem hochdynamischen internationalen Wissenschaftssystem auch kurzfristig auf neue Entwicklungen reagieren zu können. Kontinuierliche Arbeits-, Kommunikations- und „Foresight“-Prozesse sorgen dafür, dass neue Herausforderungen auch während laufender Förderphasen

frühzeitig erkannt und systematisch in neue Forschungsthemen umgesetzt bzw. mit Hilfe der Flexibilisierungsinstrumente adressiert werden. Im Rahmen des jährlichen Monitoring-Prozesses diskutiert der internationale Strategische Beirat des Forschungsbereichs Energie der HGF über die strategische und wissenschaftliche Entwicklung. Er gibt Empfehlungen an die weiteren Gremien der HGF, u. a. die Forschungsbereichsplattform und den Senat, zur dynamischen Weiterentwicklung des Forschungsportfolios.

Flexibilisierungsinstrumente zur Umsetzung dieser Empfehlungen sind beispielsweise die Initiierung von strategisch bedeutenden Zukunftsthemen im Rahmen der Förderung des Impuls- und Vernetzungsfonds, die Rekrutierungsinitiative für internationale Spitzenwissenschaftlerinnen, die Gründung von Helmholtz-Instituten auf zukünftigen Schlüsselgebieten sowie die gezielte Umwidmung von Ressourcen und Reduktion nachrangiger Forschungsthemen.

5.1.3 Fusionsforschung (Hochtemperatur-Plasmaforschung)

Die weltweite steigende Energienachfrage erfordert es aus Sicht der Bundesregierung, eine breite Palette von Optionen für die künftige Energieversorgung zu erforschen. Mit seinem herausragenden wissenschaftlichen Know-how in der Fusionsforschung hat Deutschland auch eine globale Verantwortung dafür, das Verständnis von Hochtemperatur-Plasmen und Fusionsprozessen voranzutreiben und dieses Know-how der Welt zur Verfügung zu stellen. Die Erforschung der Fusionsenergiegewinnung hat das Ziel, eine nicht auf fossile Brennstoffe angewiesene, verlässliche und wirtschaftliche Energiequelle zu erschließen. Gelingt der Schritt in die Anwendung, wird diese voraussichtlich erst nach 2050 verfügbar sein. Die Fusionsforschung ist ein Beitrag zur langfristig ausgerichteten, anwendungsorientierten Grundlagenforschung. Sie begründet sich, wie auch andere Aktivitäten der Grundlagenforschung, nicht zuletzt aus dem Streben nach Erkenntnisgewinn.

Die Förderung der Fusionsforschung erfolgt überwiegend durch die programmorientierte Förderung der HGF. An diesem Programm sind das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) sowie das Forschungszentrum Jülich (FZJ) beteiligt. Im internationalen Vergleich verfügen diese Forschungs-

institute über ein herausragendes wissenschaftliches Know-how. Mit Großgeräten wie dem Tokamak ASDEX Upgrade und dem Stellarator Wendelstein 7-X, beide am IPP, sowie dem Hochtemperatur-Helium-Kreislauf (HELOKA) und der Testeinrichtung für supraleitende Komponenten (TOSKA), beide am KIT, steht eine weltweit einmalige Infrastruktur zur Verfügung.

Die Arbeiten von IPP, KIT und FZJ sind eingebunden in das europäische Fusionsforschungsprogramm von Euratom. Das IPP koordiniert das von 30 nationalen Fusionszentren aus 26 Ländern der EU sowie der Schweiz gegründete Konsortium EUROfusion, das die neue zentrale Struktur der europäischen Fusionsforschung repräsentiert. Das IPP selbst zählt weltweit zu den führenden Instituten.

Auf europäischer Ebene ist Deutschland als Mitglied von Euratom zusammen mit allen anderen EU-Mitgliedstaaten an dem Bau des International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) in Cadarache (Südfrankreich) beteiligt. Euratom vertritt die EU im ITER-Rat. Sie ist einer der sieben Partner im Projekt, neben Japan, den USA, Russland, China, Südkorea und Indien.

ITER soll erstmals mit einem Fusionsplasma im 500-Megawatt-Bereich zehnmal mehr Energie liefern, als zur Aufheizung des Plasmas benötigt wird, und so die Machbarkeit der kontrollierten terrestrischen Energiegewinnung aus Fusionsprozessen demonstrieren. Das erste Fusionsplasma soll Ende 2025 gezündet werden. Zehn Jahre später soll dann der Vollbetrieb starten. ITER soll der Zwischenschritt zum ersten Demonstrationskraftwerk DEMO sein, das Strom ins Netz einspeist. Daher wird ITER viele Technologien testen, die in bisherigen Experimentieranlagen nicht benötigt wurden.

5.1.4 Transfer und Kommunikation

Der Transfer von Forschungsergebnissen in Wirtschaft und Gesellschaft ist ein Missionselement der HGF. Dazu dienen wissenschaftliche Publikationen und die allgemeinverständliche Kommunikation wissenschaftlicher Erkenntnisse und Forschungsergebnisse. Weitere Maßnahmen und Strukturen sind jedoch notwendig, um den Ergebnistrans-

fer zu systematisieren und zu beschleunigen. Hierzu gehören Technologietransferstellen, eine enge Zusammenarbeit mit der Wirtschaft ebenso wie die rasche Patentierung von FuE-Ergebnissen. Auch über Ausgründungen und Startups kann der Transfer in die Praxis gelingen. Zentral sind in jedem Fall die frühzeitige Vermittlung unternehmerischer Kompetenzen und die Etablierung einer wissenschaftlichen Kultur, in der die wirtschaftliche Verwertung von Forschungsansätzen frühzeitig mitgedacht wird. Unternehmerisches Scheitern darf in diesem Zusammenhang nicht als Makel empfunden werden. Startups, wie auch wissenschaftlichen Untersuchungen, ist die Möglichkeit des Misserfolgs inhärent. Die Unterstützung von Ausgründungen mit öffentlichen Mitteln bedarf einheitlicher und klarer Regeln – in der HGF und darüber hinaus. Denn juristische Unsicherheiten binden nicht nur Ressourcen in den Zentren, sondern verschrecken auch mögliche Investoren.

Zu den Aufgaben der Forschungskommunikation gehört neben der Vorbereitung des Praxistransfers vor allem die Veröffentlichung der Forschungsinhalte sowie der wissenschaftlichen Erfolge und Fehlschläge. Denn es geht darum, über die Verwendung der für die Forschung zur Verfügung gestellten öffentlichen Mittel zu informieren. Die Relevanz der geleisteten Arbeit für die adressierten gesellschaftlichen Herausforderungen muss dargestellt und sowohl intern als auch im Austausch mit Wirtschaft, Politik und interessierter Öffentlichkeit kritisch hinterfragt werden.

Dem Forschungsbereich Energie der HGF kommt aufgrund seiner Größe und Systemkompetenz mit Blick auf den öffentlichen Dialog zu Fragen des Energiesystems und der Energieforschung eine besondere Rolle und Verantwortung zu. Ziel ist ein Austausch zwischen der interessierten Öffentlichkeit, Wissenschaft, Wirtschaft und Politik auf der Grundlage fundierter Informationen und wissenschaftlicher Erkenntnisse. Der gesellschaftliche Diskurs darf sich dabei nicht in der Erläuterung der Energieforschung und ihrer Ergebnisse erschöpfen. Gelungene gesellschaftliche Diskurse lassen sich als eine Art von Technikfolgenabschätzung betrachten, die die professionelle Analyse von Technikfolgen multiperspektivisch ergänzt. Besorgnisse, Forderungen, Kritik und Ideen aus der Gesellschaft können so frühzeitig aufgenommen und in Forschung und Technikentwicklung berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.4.5).

5.2 Weitere institutionell geförderte Forschung

Neben der HGF gibt es zahlreiche weitere Wissenschaftsorganisationen in Deutschland, deren Grundfinanzierung von Bund und Ländern im Rahmen der gemeinsamen Forschungsförderung nach Art. 91b GG geleistet wird, die aber außerhalb des Energieforschungsprogramms zum Erkenntnisgewinn in der Energieforschung beitragen. Beispielsweise wird der Anteil der Energieforschung innerhalb der institutionellen Förderung der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) oder der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) deshalb statistisch nicht in der Haushaltsübersicht zum 7. Energieforschungsprogramm aufgeführt. Diese weiteren institutionell geförderten Einrichtungen bilden jedoch eine wichtige Stütze der Energieforschung in Deutschland. Ihre aktive Beteiligung an den *Forschungsnetzwerken Energie* ist essenziell für eine erfolgreiche Vernetzung, die die gesamte Breite der Energieforschung in Deutschland umfasst.

Die FhG setzt im Energiebereich die Schwerpunkte Nachhaltigkeit, Sicherung und Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung, Energieumwandlung, Energie- und Ressourceneffizienz und Elektromobilität um. Einige Institute ihrer Energie-Allianz wie IWES, ISE, IBP, IEE und UMSICHT sind besonders eng mit der Energieforschung verknüpft. Auch

an zahlreichen anderen Instituten findet Energieforschung statt. Als größte Forschungsorganisation für anwendungsorientierte Forschung in Europa ist Fraunhofer als Partner der Wirtschaft an vielen anwendungsorientierten Verbundvorhaben der Projektförderung im Rahmen des Energieforschungsprogramms beteiligt.

Die MPG widmet sich mit ihrer Energieforschung den Zielen, die Energieeffizienz zu steigern, bisherige Energiequellen besser zu nutzen und neue Energiequellen zu erschließen. Sie leistet insbesondere im Bereich der anwendungsorientierten Grundlagenforschung wichtige Beiträge zur Energieforschung, z. B. durch folgende Institute: MPI CEC, MPI für Kohleforschung, Fritz-Haber-Institut oder MPIKG. Auch in der Leibniz-Gemeinschaft findet in verschiedenen Instituten Energieforschung statt, z. B. im LIKAT, im FIZ Karlsruhe oder im PIK. Beiträge zur Energieforschung sowie wissenschaftliche Expertise zur Energiewende stellen zudem die Wissenschaftsakademien, vor allem Acatech und Leopoldina, bereit. In diesem Kontext ist das ESYS-Projekt zu nennen. Daneben gibt es weitere Institute, die zum Teil aus Bundesmitteln finanziert werden und sich Teilbereichen der Energieforschung widmen, z. B. das ZSW oder das DBFZ.

6. Internationale Zusammenarbeit



6.1 Internationalisierungsstrategie der Forschungspolitik

Erfolgreiche Innovationen aus Forschung und Entwicklung sind für die Bundesregierung ein wichtiges Ziel zur Stärkung globaler Wettbewerbsfähigkeit und Sicherung von Arbeitsplätzen. Dazu können verstärkte länderübergreifende Kooperationen in besonderem Maße beitragen. Sie unterstützen die Umsetzung und das Einhalten europäischer wie globaler Ziele des Klimaschutzes und der Transformation der Energiesysteme, wie sie z. B. im Rahmen der Pariser Klimaschutzkonferenz (COP21) 2015, der UN Sustainable Development Goals (Goal 7: Affordable and Clean Energy) und des G7-Prozesses vereinbart wurden. Die Bundesregierung unterstreicht dieses Bekenntnis durch ihr vielfältiges internationales Engagement. Neben bi- und multilateralen thematischen Initiativen unterstützt sie insbesondere die Zusammenarbeit auf europäischer Ebene im EU-Rahmenprogramm zu Forschung und Innovation sowie die Beteiligung an Förderinitiativen der Internationalen Energieagentur (IEA).

Bilaterale Zusammenarbeit

Forschungs- und Innovationsprozesse vernetzen sich zunehmend auf globaler Ebene. Um international wettbewerbsfähig zu bleiben, ist eine verstärkte Zusammenarbeit von Forschungsakteuren erforderlich. Grundlage für bilaterale Forschungsaktivitäten können die Abkommen für wissenschaftliche und technologische Zusammenarbeit (WTZ) bilden. In den Rahmenabkommen werden insbesondere Fragen der Finanzierung des Austausches von Wissenschaftlern und Studenten bis hin zu Erleichterungen bei Zoll- und Visaformalitäten im Rahmen der Zusammenarbeit geregelt. Bis Ende 2010 unterhielt Deutschland 48 WTZ-Abkommen mit Regierungen auf der ganzen Welt. Die Abkommen werden ständig weiterentwickelt und den aktuellen Gegebenheiten angepasst. In den kommenden Jahren stehen in der Grundlagen- und Systemforschung die bilateralen Partnerschaften mit Frankreich, Griechenland, Australien sowie Entwicklungspartnerschaften mit afrikanischen Ländern im Vordergrund.

Frankreich

Gemeinsam wollen Deutschland und Frankreich die Rolle Europas im Kampf gegen den Klimawandel und für die Energiewende stärken. Ein zentrales Element ist die Kooperation mit der Agence Nationale de la Recherche in der anwendungsorientierten Grundlagenforschung zu Speichern und Netzen. In 2+2-Verbundprojekten sollen deutsche und französische Partner aus Wissenschaft und Wirtschaft hochinnovative, sektorübergreifende und systemische Lösungen für eine wirtschaftliche, umweltfreundliche und sichere Energiespeicherung und -verteilung in Frankreich, Deutschland und Europa entwickeln. Daneben werden ökonomische und gesellschaftliche Aspekte sowie die wirtschaftlichen, rechtlichen und gesellschaftlichen Spezifika der Partnerländer und die daraus resultierenden Implikationen für systemische Innovationen sowie Maßnahmen zur Netzwerkbildung adressiert.

Griechenland

Die Energieforschung ist eine von mehreren Säulen der Forschungsk Kooperation zwischen Deutschland und Griechenland. Gemeinsame Vorhaben etwa zu effizienten Insellösungen der Energieversorgung, zu solarthermischen Wärme- und Kältemaschinen oder zur gebäudeintegrierten Photovoltaik geben wertvolle Impulse für nachhaltige Systemlösungen im mediterranen Raum und erschließen für KMU in Deutschland wie Griechenland Märkte für innovative Produkte.

Australien

Die Bundesregierung wird im Rahmen der Energiepartnerschaft mit Australien die wissenschaftliche und technologische Zusammenarbeit ausbauen.

Afrika

Energiefragen sind ein Schlüssel für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung in Afrika. Es ist von hohem wirtschafts-, sicherheits- und migrationspolitischem Interesse,

zu einem Abbau des Entwicklungs- und Wohlstandsgefälles beizutragen. Wohlstandsentwicklungen in Afrika hängen wesentlich von der Urbanisierung und Industrialisierung sowie einer verlässlichen Stromversorgung ab. Derzeit haben 75 Prozent der Afrikaner (600 Millionen Menschen) keinen Zugang zur Stromversorgung. Die Bundesregierung engagiert sich im Rahmen der Zentren „WASCAL“ (West African Science Service Centre for Climate Change and Adaptive Land Management) und „SASSCAL“ (South African Science Service Centre for Climate Change and Adaptive Land Management) erfolgreich in mehr als 15 Ländern Afrikas. Auf Basis dieser Strukturen wird die Bundesregierung ihr Engagement im Bereich der erneuerbaren Energien ausbauen. Der Fokus liegt dabei auf folgenden strategisch wichtigen FuE-Themen:

- Erhebung belastbarer Daten, Auswertung und Abschätzung der Bedarfe und Potenziale
- Identifizierung und Entwicklung technischer Strategien und Szenarien; dabei Ausrichtung der Forschung auf lokale klimatische, ökonomische und gesellschaftliche Bedingungen
- Entwicklung bedarfsorientierter Maßnahmen in Abstimmung mit den Stakeholdern und Entscheidungsträgern der Zielländer
- gemeinsame Erarbeitung von Ausbildungskonzepten

6.2 Europäische Zusammenarbeit

Energieunion und Europäischer Strategischer Energietechnologieplan (SET-Plan)

Der SET-Plan definiert innerhalb der europäischen Energieunion ein strategisches Konzept mit einer langfristigen Agenda zur Bewältigung von Innovationsengpässen, von der Forschung bis zur Markteinführung innovativer Energietechnologien. Er bündelt die Anstrengungen von EU-Mitgliedern und assoziierten Staaten in Abstimmung mit Akteuren aus Forschung (vertreten durch die European Energy Research Alliance, EERA) und Industrie (vertreten durch European Technology and Innovation Platforms, ETIPs), unter Beteiligung der Europäischen Kommission. Deutschland wirkt im SET-Plan-Rahmen an strategischen Vorhaben (Key Actions) zu nicht-nuklearen Energiethematik mit, die durch Arbeitsgruppen in technologiespezifischen Implementierungsplänen definiert werden. Die Themen umfassen u. a. erneuerbare Energien, smarte Energiesysteme, Energieeffizienz und nachhaltigen Transport. Diese Anstrengungen sind eng mit den Themen des vorliegenden 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung sowie dem Europäischen Forschungsrahmenprogramm („Horizon 2020“ bzw. dem Nachfolgeprogramm „Horizon Europe 2021 – 2027“) koordiniert. Im so genannten *Berliner Modell* definieren nationale Förderorganisationen gemeinsame Forschungsprojekte auf Grundlage des SET-Plans, mit

denen Forschungspartner in den jeweils beteiligten Ländern aus nationalen Mitteln gefördert werden.

Für eine europäische und internationale Kooperation können sich deutsche Projektpartner auch an Netzwerk-Initiativen wie EUREKA/EUROGIA oder COST beteiligen. Die Fördermöglichkeiten für anteilige Projektarbeiten der deutschen Partner können auf Basis einer Antragstellung im üblichen nationalen Verfahren geprüft werden.

EU-Forschungsrahmenprogramm

Mit einem Förderbudget von knapp 80 Milliarden Euro stärkt das europäische Rahmenprogramm „Horizon 2020“ (Laufzeit 2014 – 2020) die globale Wettbewerbsfähigkeit Europas bei Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsprozessen. Im Bereich der gesellschaftlichen Herausforderung *Sichere, saubere und effiziente Energie* sind für die nicht-nuklearen Energietechnologien insgesamt rund 5,9 Milliarden Euro eingeplant. Bis 2020 werden hier noch rund 2 Milliarden Euro als Fördermittel für exzellente Projektvorschläge vergeben. In diesem Rahmen beteiligt sich die Bundesregierung an der inhaltlichen Ausgestaltung des EU-Rahmenprogramms und setzt sich u. a. für die Vereinfachung und Beschleunigung von Förderverfahren ein.

Die übergeordneten Ziele der europäischen Energie- und Klimapolitik sind auf eine Dekarbonisierung und Sicherung in der Energieversorgung ausgerichtet. Fortschritte hierzu werden Europa auch im globalen Wettbewerb stärken. Die weitere Steigerung der Energieeffizienz, die umfassende Nutzung von erneuerbaren Energien und auch ihre nachhaltige Integration in europäischen Energiesystemen sind Beispiele für Themen- und Förderschwerpunkte, die dazu wichtige Beiträge liefern.

Bei der inhaltlichen Ausrichtung konkreter Umsetzungsmaßnahmen folgt das EU-Rahmenprogramm den Zielsetzungen des SET-Plans. Dort werden die Förderanstrengungen auf europäischer und nationaler Ebene effizient gebündelt und wird mit einer langfristigen Agenda zur Bewältigung von Innovationsengpässen die EU-Politik

zur Energieunion (*Energy Union*) unterstützt. Die Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg wird dabei besonders gefördert. Mit den Instrumenten des ERA (European Research Area)-Net werden themenspezifische Kooperationen, Abstimmungen und gemeinsame Ausschreibungen zwischen nationalen Förderorganisationen auch europäisch unterstützt und koordiniert.

Ab 2021 wird das neue, 9. EU-Rahmenprogramm die Anstrengungen von „*Horizon 2020*“ mit neuer Ausrichtung fortführen.

6.3 Internationale Organisationen

Internationale Zusammenarbeit im Rahmen der Internationalen Energieagentur (IEA)

Als selbständige Einrichtung der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) berät die IEA die Regierungen ihrer 30 Mitgliedsländer und internationale Organisationen in energiewirtschaftlichen Fragestellungen. Darüber hinaus bietet sie mit ihrem Energietechnologienetzwerk (ETN) eine Kooperationsplattform für die Forschung und Entwicklung von Energietechnologien. Das Lenkungsgremium des ETN ist der Ausschuss für Energieforschung und Technologie (Committee on Energy Research and Technology, CERT), der die FuE-Aktivitäten auf politischer Ebene koordiniert. Unterstützt wird er dabei durch spezifische Empfehlungen von vier sich jeweils unterschiedlichen Themenfeldern widmenden Arbeitsgruppen (Working Parties). Die dem CERT und den Working Parties unterstellten Technologiekooperationsprogramme der IEA (Technology Collaboration Programmes, TCP) bilden das gesamte energietechnologische Spektrum ab und sind das wichtigste Instrument für die Umsetzung der internationalen Zusammenarbeit. Deutschland partizipiert aktuell an 22 der insgesamt 38 laufenden TCP und bringt seine nationale Expertise in den internationalen Austausch ein.

Sonstige internationale Organisationen

Neben den Arbeiten in der IEA, die nahezu das gesamte Spektrum an Energietechnologien betrachtet, gibt es weitere internationale Organisationen und Gremien, die sich ausgewählten Aspekten der Technologieentwicklung oder speziellen Technologien widmen. Wichtig sind vor allem die *International Renewable Energy Agency, IRENA*, die *European Energy Research Alliance, EERA*, die *Association of European Renewable Energy Research, EUREC*, das *Carbon Sequestration Leadership Forum, CSLF*, oder die *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, IPHE*. 2009 wurden im Rahmen des *Clean Energy Ministerial, CEM*, einer internationalen Initiative auf Energieministerebene, ebenfalls Foren zu verschiedenen Energietechnologien gegründet. In ihnen arbeitet auch Deutschland mit, beispielsweise zu den Themen Intelligente Netze oder Elektrofahrzeuge.

6.4 Internationale Zusammenarbeit in der nuklearen Sicherheitsforschung

Die Effektivität der deutschen Forschung lebt und profitiert von den Möglichkeiten, die sich aus der internationalen Zusammenarbeit und dem damit zusammenhängenden wechselseitigen wissenschaftlichen Austausch ergeben. Nur durch fundierte sicherheitstechnische Kompetenz, die auf Basis eigenständiger Forschung und Entwicklung zur nuklearen Sicherheit international eingebracht wird, kann Deutschland auch künftig in internationalen Sicherheitsdiskussionen ausreichend Gehör finden und seine berechtigten Sicherheitsinteressen vertreten.

Daher werden deutsche Forschungsstellen durch die Bundesregierung ausdrücklich darin unterstützt, sich an Aktivitäten z. B. der Europäischen Union (Euratom), der internationalen Atom-Energie-Organisation (IAEO) oder der Nuklear-Energie-Agentur (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zu beteiligen und sich in Konsortien und Arbeitsgruppen einzubringen, in denen die wechselseitige Nutzung wissenschaftlicher Erkenntnisse und Daten sowie eine die Pro-

jekte überdauernde Zusammenarbeit im Vordergrund stehen. Diese Beteiligung gewährt Einblicke in internationale Entwicklungen und sichert, dass auch von deutscher Seite gestaltend Einfluss genommen werden kann.

Die international vernetzte Nutzung deutscher kerntechnischer und wissenschaftlich-technischer Infrastruktur und Expertise sowie eine deutsche Beteiligung an internationalen Projekten ermöglichen die kostenteilige Nutzung international verfügbarer Versuchsstände und Untertage-laboratorien. Sie gewährleisten zudem einen Austausch von Expertise und machen damit die nukleare Sicherheits- und Entsorgungsforschung in Deutschland effizienter. Dies hilft, das deutsche Sicherheitsinteresse zu wahren.

6.5 Mission Innovation

Im November 2015 wurde am Rande des Pariser Klimaabkommens (COP21) die Initiative *Mission Innovation* (MI) gegründet, der inzwischen 23 Staaten und die Europäische Union angehören. Die Staaten, darunter Deutschland, haben sich verpflichtet, die öffentlichen Investitionen in Forschung und Entwicklung für saubere Energien innerhalb von fünf Jahren zu verdoppeln. Im Rahmen der COP21 haben sich zudem private Geldgeber in der Initiative *Breakthrough Energy Coalition* zusammengeschlossen, die die öffentlichen Anstrengungen ergänzt. Mit dem World Economic Forum, der IEA und der IRENA besteht ein enger Austausch. Jährliche Ministertreffen tra-

gen dazu bei, das Thema Energieinnovation und die Notwendigkeit einer globalen Energiewende auf hoher politischer Ebene präsent zu halten. Zudem finden im Rahmen von *Mission Innovation* zahlreiche weitere Aktivitäten statt, beispielsweise acht *Innovation Challenges* zu wichtigen Themen der Energieforschung oder die Initiative *MI Champions*, die herausragende Individuen der Energieinnovation auszeichnet.

Anhang

Glossar

Das Glossar enthält Begriffe, die im allgemeinen Sprachgebrauch keine klare oder eine abweichende Definition haben. Einige Begriffe wurden aus dem Informationsportal EnArgus (enargus.de) übernommen. Dort steht ein Wiki mit vielen weiteren Begriffen zur Verfügung.

Berliner Modell: Zur Förderung von internationalen Kooperationsprojekten als Verbundvorhaben mit Partnern aus mehreren Ländern übernimmt im Berliner Modell jedes beteiligte Land die Förderung der Projektpartner im jeweils eigenen Land. Das Berliner Modell dient insbesondere der unbürokratischen und effizienten Umsetzung des europäischen Strategic Energy Technology Plan (*SET-Plan*).

Big Data: sind große, unstrukturierte Datenmengen hoher Komplexität und Variabilität. Dabei können unterschiedlichste Arten von Daten gemeint sein, wie zum Beispiel Sensordaten von intelligenten Objekten, Daten von Social-Media-Nutzern, Finanzzahlen oder Energieverbrauchsdaten. Damit diese großen Datenmengen sinnvoll verarbeitet werden können, werden immer größere Rechenleistungen oder innovative Verarbeitungsmethoden benötigt.

Building Information Modeling (BIM): steht für eine Methode der digitalen Planung, bei der ein *Digitaler Zwilling (Digital Twin)* eines Gebäudes erstellt wird. Mithilfe dieses digitalen Modells können Planung, Bauausführung und der Gebäudebetrieb optimiert werden und kann flexibel auf geänderte Ansprüche reagiert werden. Auch das Thema *Lebenszyklusanalyse* kann in den Prozess des BIM integriert werden.

Blockchain: Die Blockchain-Technologie (auch Distributed Ledger Technology) ist eine Art Buchführungssystem auf Basis einer dezentralen, für alle Beteiligten vollständig einsehbaren Datenbankstruktur, das Transaktionen verzeichnet. Die Transaktionen sind dabei für die Transaktionspartner verifizierbar, ohne dass diese in direkten Austausch treten müssten oder eine dritte Instanz, der beide vertrauen, nötig wäre. Sie dient z. B. als Grundlage vieler digitaler Währungen. Worüber genau in diesem System Buch geführt wird, ist für das Prinzip der Blockchain unerheblich, wodurch das Prinzip auch in anderen Wirtschaftsbereichen (z. B. Stromhandel) zur Anwendung kommen könnte.

CO₂-Kreislaufwirtschaft: Die CO₂-Kreislaufwirtschaft zielt auf eine Reduktion von CO₂-Emissionen, indem für bestimmte Industrieprozesse, bei denen die Entstehung von CO₂ schwer oder gar nicht vermeidbar ist, Technologien zur Schließung des Kohlenstoffkreislaufs entwickelt werden. Dabei handelt es sich beispielsweise um CO₂-Technologien für Abscheidung, Transport, Speicherung, aber auch um Technologien zur Verwendung von CO₂ in der chemischen Industrie, beispielsweise zur Herstellung flüssiger Kraft- und Brennstoffe.

CCS: Carbon (Dioxide) Capture and Storage, CO₂-Abscheidung und -Speicherung: Technologien für Abscheidung, Transport und Speicherung von CO₂, das z. B. bei Industrieprozessen freigesetzt wird.

CCU: Carbon (Dioxide) Capture and Utilization, CO₂-Abscheidung und -Nutzung: Technologien für die Nutzung von CO₂ für Anwendungen in der chemischen Industrie oder zur Erzeugung von Kraft- und Brennstoffen.

Dekarbonisierung: bezeichnet die Umstellung einer Wirtschaftsweise mit dem Ziel eines niedrigeren Umsatzes von Kohlenstoff. Dabei sollen insbesondere Handlungen und Prozesse, die CO₂ freisetzen, durch emissionsarme Alternativen ersetzt werden.

Digitaler Zwilling (Digital Twin): stellt ein wichtiges Element für eine digitale Darstellung und Integration der Produktions-, Betriebs- und Wartungsprozesse im industriellen Kontext und die Basis für eine Gebäude- und Quartiersmodellierung dar. Dabei handelt es sich um digitale Modelle oder ein mit realen Messwerten gefülltes digitales Abbild realer Anlagenkomponenten oder auch Steuerungsmodule, mit denen sich einerseits industrielle Anlagen und deren Betrieb und andererseits Gebäude und Quartiere simulieren und optimieren lassen.

Digitalisierung: bezeichnet den durch Digitaltechnik und Computer ausgelösten Umbruch, der seit einigen Jahrzehnten einen Wandel nahezu aller Lebensbereiche bewirkt (Digitale Revolution). Die Digitalisierung der Energiewende steht dementsprechend als Sammelbegriff für eine Vielzahl von hochdynamischen Entwicklungen im Bereich moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) und deren Anwendungen im Energiesystem, sowie deren Auswirkungen auf das Energiesystem.

Endenergie: ist der nutzbare Teil der Primärenergie (siehe *Energiekette*), der den Verbrauchern zur Verfügung steht. Sie errechnet sich aus der Primärenergie abzüglich der Verluste durch die Energieumwandlung und den Energietransport.

Energieerzeugung: Physikalisch ist Energie eine Erhaltungsgröße, Energieerzeugung ist also nicht möglich. Der umgangssprachliche Begriff Energieerzeugung bezeichnet jedoch die Bereitstellung von nutzbarer Energie, insbesondere von elektrischer Energie, durch Energieumwandlung. So wird die Umwandlung von Wind- oder Sonnenenergie in Strom häufig als Energieerzeugung bezeichnet.

Energiekette: Die sukzessive Umwandlung von Energie von einer Ausgangsform, die als Primärenergie bezeichnet wird, bis hin zur Energiedienstleistung beim Verbraucher.

Energieverbrauch: Genau wie die Erzeugung von Energie ist auch deren Verbrauch eine umgangssprachliche Bezeichnung. Gemeint ist die Umwandlung von nutzbarer Energie (Exergie) in Umgebungswärme (Exergieverluste, bzw. Entropieerzeugung).

ERA-Net: In einem ERA-Net bilden Forschungsförderorganisationen bzw. Programmagenturen mehrerer EU-Mitgliedstaaten eine Partnerschaft (Konsortium) zu einem bestimmten Thema. Ziel ist die strategische Koordination nationaler Programme. Dazu führen die Konsortialpartner, gefördert durch die EU, gemeinsame Ausschreibungen für die Förderung transnationaler Forschungs- bzw. Innovationsprojekte durch.

Förderbekanntmachung: Auf Grundlage des 7. Energieforschungsprogramms können Förderbekanntmachungen und Förderrichtlinien erstellt werden. Diese werden im Bundesanzeiger veröffentlicht, konkretisieren das Förderverfahren und können basierend auf aktuellen forschungs- oder energiepolitischen Entwicklungen Schwerpunkte setzen (siehe *Förderinitiative*).

Förderinitiative: Um bestimmte Forschungsthemen oder Herausforderungen der Energiewende besonders zu adressieren oder um besondere Formate der Forschungsförderung umzusetzen, initiiert die Bundesregierung zu gegebener Zeit Förderinitiativen. Diese können von einzelnen oder mehreren Ressorts umgesetzt werden und werden als Förderbekanntmachung veröffentlicht. Damit steht der Bundesregierung ein Instrument zur Verfügung, um auch während der Laufzeit des Energieforschungsprogramms flexibel auf aktuelle Entwicklungen reagieren zu können.

Förderrichtlinie: siehe Förderbekanntmachung.

Implementierungsgruppe: siehe Temporary Working Group

Industrie 4.0: ist ein Konzept, das die Digitalisierung und komplette Vernetzung in der Fertigungstechnik und Logistik bezeichnet.

Konditionierung (Kernenergie): Durch die Konditionierung werden radioaktive Abfälle in einen chemisch stabilen Zustand überführt und damit den Anforderungen von Transporten und/oder Endlagerung entsprechend verpackt. Dazu werden unterschiedliche Verfahren verwendet.

Konditionierung (Elektrolyse): Der durch die unterschiedlichen Verfahren der Wasserelektrolyse erzeugte Wasserstoff bedarf einer individuellen Konditionierung. Verschiedene technische Verfahren der Nachbehandlung erlauben insbesondere eine nötige Trocknung und Komprimierung des Wasserstoffs zum optimalen Einsatz in Lagerung, Verteilung und Anwendung. Die Gaskonditionierung ist energieintensiv und prozesskostenrelevant.

Kreislaufwirtschaft: Unter Kreislaufwirtschaft versteht man das Bestreben, das Abfallaufkommen zum einen durch Vermeidungsmaßnahmen und Verwertungsmaßnahmen zu reduzieren und zum anderen nicht vermeidbare Abfälle durch fachgerechte Aufbereitungsverfahren als Sekundärrohstoffe in den Wirtschaftskreislauf zurückzuführen. Das Modell der Kreislaufwirtschaft wird durch den strategischen Ansatz des *Zirkulären Wirtschaftens* (Circular Economy) weiterentwickelt.

Künstliche Intelligenz (KI): Gemeint sind Computerprogramme und Maschinen, die über Fähigkeiten verfügen, die zuvor als ausschließlich dem biologischen Gehirn zukommend angesehen wurden (z. B. Go spielen, Auto fahren, Gesichter erkennen, Sprache übersetzen). Man unterscheidet

det zwischen der schwachen und starken KI (dem Menschen in einzelnen (schwach) oder allen (stark) Aspekten ebenbürtige oder überlegene intellektuelle Fähigkeiten). Für die Energieforschungsförderung ist die schwache KI relevant.

Layout: Die gestalterisch bewusst vorgenommene Platzierung bzw. geplante räumliche Anordnung. Beispielsweise also die Anordnung von Windenergieanlagen in Windparks oder Anlagen in einer Fabrik.

Lebenszyklusanalyse: Eine Lebenszyklusanalyse (auch Umweltbilanz, Ökobilanz oder Life Cycle Assessment) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten. Zur Lebenszyklusanalyse gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzung und der Entsorgung des Produktes sowie gegebenenfalls die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe).

LowEx: Der Ansatz der Niedrig-Exergie-(LowEx-)Systeme im Bereich der Wärmeversorgung versucht, die Temperaturdifferenzen zwischen räumlich nahen Komponenten in einem Wärmesystem so gering wie möglich zu halten. Dadurch werden die Exergieverluste (siehe *Energieverbrauch*) durch Wärmeleitung oder die Notwendigkeit von Wärmedämmung reduziert.

Maschinelles Lernen: Maschinelles Lernen ist ein Teilgebiet der *Künstlichen Intelligenz*. Lernende Algorithmen können auf Basis von Datenbeständen selbständig Muster erkennen, Lösungsstrategien oder Fähigkeiten entwickeln. Einmal entwickelte Algorithmen können erfolgreich ganz unterschiedliche Probleme oder Zielstellungen adressieren, ohne dass der zugrundeliegende Algorithmus angepasst werden müsste.

Multibridsysteme: Ein Strom- und Wärmeerzeugungskonzept bestehend aus mindestens drei unterschiedlichen miteinander gekoppelten Energieanlagen. Im Vergleich dazu umfasst ein Hybridsystem lediglich zwei miteinander gekoppelte Anlagen.

Nachhaltigkeit: Nachhaltigkeit ist ein Prinzip, nach dem nicht mehr verbraucht werden darf, als jeweils nachwachsen, sich regenerieren oder künftig wieder bereitgestellt werden kann. Allgemeiner bezeichnet der Begriff Handlungsweisen, die auch langfristig und aus möglichst vielen Blickwinkeln positiv bewertet werden können.

Offshore: wird hauptsächlich im Kontext von Windenergieanlagen verwendet und bezeichnet dort die Position der Windenergieanlage auf dem offenen Meer.

Onshore: wird hauptsächlich im Kontext von Windenergieanlagen verwendet und bezeichnet dort die Position einer Windenergieanlage, die sich im Binnenland befindet.

Open-Access: Open-Access ist der freie Zugang zu wissenschaftlicher Literatur und anderen Materialien im Internet. Ein wissenschaftliches Dokument unter Open-Access-Bedingungen zu publizieren, gibt jedermann die Erlaubnis, das Dokument zu lesen, herunterzuladen, zu speichern, zu verlinken, zu drucken und damit entgeltfrei zu nutzen. Darüber hinaus können über freie Lizenzen weitere Nutzungsrechte eingeräumt werden (z. B. freie Nach- und Weiternutzung).

Open-Data: Solche Daten können durch die Verwendung offener Nutzungsrechte von jedermann frei verwendet, nachgenutzt und verbreitet werden. Die Nutzung dieser offenen Daten darf laut der Open-Definition nur eingeschränkt werden, um den Ursprung durch Quellennennung und die Offenheit der in ihnen enthaltenen Informationen sicherzustellen. Diese Daten dürfen jedoch keine personenbezogenen Daten oder Daten, die dem Datenschutz unterliegen, beinhalten.

Open-Source: Bezeichnung für Software, deren Quelltext öffentlich zugänglich sowie frei nutzbar ist und dadurch nachvollziehbar oder nachprüfbar wird.

Peripherie: bezeichnet alle Nebenaggregate einer erneuerbaren oder auch konventionellen Energieerzeugungsanlage wie Verkabelung, Montagesystem oder Rückkühlung.

Plasmaprozesse: Nutzung eines Plasmas, also eines sehr heißen, reaktiven Gemischs aus neutralen und geladenen Teilchen, für technische (z. B. Reinigen, Ätzen, Beschichten), chemische (z. B. plasmainduzierte Wasserspaltung) oder nukleare Prozesse (Kernfusion).

Post-Li-Batterien: Dieser Sammelbegriff umfasst Batterietechnologien mit einer Zellchemie, die gegenüber der heutigen Zellchemie der Lithium-Ionen-Batterie höhere Energiedichten bereitstellen sollen, wie sie insbesondere für mobile Anwendungen benötigt werden.

Power-to-Chemicals: bezeichnet die Nutzung von erneuerbarem Strom für die Herstellung von chemischen Energieträgern oder anderen chemischen Stoffen, für deren Herstellung viel Energie benötigt wird, zur Nutzung in der chemischen Industrie.

Power-to-Fuels: bezeichnet die Nutzung von erneuerbarem Strom zur Erzeugung von Kraftstoffen für den Verbrennungsantrieb von z. B. Autos, LKW, Schiffen oder Flugzeugen.

Power-to-Gas: steht für ein Konzept, bei dem Strom aus erneuerbaren Energien zunächst in Wasserstoff und dann ggf. durch chemische Synthese in Methan umgewandelt und ins Erdgasnetz eingespeist wird.

Power-to-Heat: umfasst die Umwandlung von Strom aus erneuerbaren Energien in Wärme. Technisch kann dies z. B. durch Wärmepumpen oder elektrische Widerstandsheizung geschehen. Zur Flexibilisierung der Stromnachfrage geschieht dies meist in Kombination mit einem thermischen Speicher.

Power-to-Hydrogen: beschreibt die Umwandlung von erneuerbarem Strom zu Wasserstoff durch die Zerlegung von Wasser. Der Begriff wird insbesondere dann verwendet, wenn der Wasserstoff in das Gasnetz eingespeist, in Brennstoffzellen rückverstromt oder einer Wasserstoff-Logistik zugeführt wird.

Power-to-Liquids: bezeichnet allgemein die Möglichkeit, erneuerbaren Strom in flüssige Energieträger umzuwandeln (z. B. Methanol, Ethanol, Kerosin, Benzin, Diesel und weitere chemische Energieträger). Der Begriff ist also teilweise synonym zu Power-to-Fuels.

Power-to-X: Das „X“ kann für „Hydrogen“, „Gas“, „Liquids“, „Fuels“, „Chemicals“ oder „Heat“ stehen. Damit ist die Umwandlung von regenerativ erzeugtem Strom in diese Stoffe oder Energieformen gemeint. Dieses Konzept ist entscheidender Bestandteil der Sektorkopplung.

Prosumer: In der Energiewirtschaft beschreibt dieses Kunstwort einen Energieverbraucher (engl. consumer), der gleichzeitig Energie produziert (engl. producer), z. B. eine Eigenheimbesitzerin, auf deren Hausdach eine Photovoltaikanlage installiert ist.

Quartier: Ein Quartier im Kontext der Energieforscher ist ein geographisch zusammenhängendes Wohnumfeld, als nächsthöhere Gliederungseinheit zur individuellen Wohneinheit. Im urbanen Umfeld kann das z. B. ein Wohnblock oder die direkte Umgebung von identitätsstiftenden Straßen und Plätzen sein, im ländlichen Raum z. B. ein Dorf oder Ortsteil.

Reallabore: sind große, thematisch übergreifende und systemisch angelegte Querschnittsprojekte, in denen das Zusammenwirken von unterschiedlichen Energietechnologien in der realen Anwendungsumgebung erprobt werden soll. Innovative Konzepte zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele bilden hierfür die Grundlage. Anpassungen des regulatorischen Rahmens können Teil der Reallabore sein. Ein enges wissenschaftliches Monitoring ist Teil eines Reallabors. Untersucht werden insbesondere solche Forschungsfragen, die sich in den künstlichen Bedingungen einer Laborumgebung nicht untersuchen lassen. Ziel von Reallaboren ist in erster Linie der beschleunigte Transfer von Innovationen in die Praxis.

Recycling: Der Begriff Recycling umfasst viele Prozesse zur erneuten Nutzung von Rohstoffen. Es ist zu unterscheiden zwischen dem Produktrecycling und dem Stoffrecycling. Das Produktrecycling bezeichnet die Wiederaufbereitung eines Produkts oder eines Teils davon für den gleichen (Wiederverwendung) oder einen anderen Zweck (Weiterverwendung). Das Stoffrecycling bezeichnet die Rückführung der eigentlichen Stoffe durch eine mechanische und metallurgische oder chemische Aufbereitung.

Regulatorische Rahmenbedingungen: Als regulatorischen Rahmen bezeichnet man die Gesamtheit aller geltenden Gesetze und Vorschriften, die das wirtschaftliche Handeln in einem Wirtschaftssektor bestimmen.

Rekuperation: Ausdruck für technische Verfahren zur Energierückgewinnung (z. B. Feuerungsanlagen mit Luftvorwärmung oder regeneratives Bremsen in Elektroautos).

Repowering: bezeichnet das Austauschen (von alten Teilen) von Energieerzeugungsanlagen durch neue, das typischerweise zur Leistungserhöhung oder Effizienzsteigerung dient. Beispielsweise werden ältere Windenergieanlagen an einem vorhandenen Standort durch größere, leistungstärkere Windenergieanlagen ersetzt.

Resilienz: bezeichnet die Eigenschaft eines Systems, bei Störungen bzw. Teilausfällen nicht vollständig zu versagen, sondern wesentliche Systemleistungen aufrechtzuerhalten.

Ressourceneffizienz: bezeichnet die effiziente Nutzung von technisch-wirtschaftlichen und natürlichen Ressourcen. Diese Ressourcen können materielle oder immaterielle Güter sein. Ein Beispiel für die Erhöhung der Ressourceneffizienz in Hinblick auf Rohstoffe ist das Recycling.

Saisonaler Energiespeicher: bezeichnet Energiespeicher, die große Energiemengen über mindestens mehrere Monate und ohne signifikante Verluste speichern. Beispiele sind Aquifer- oder Grundwasserspeicher für Wärme sowie bestimmte Pumpspeicherkraftwerke für Strom oder stoffliche Speicher wie Wasserstoff oder Methan.

Sanierungspfade: bezeichnen bezogen auf ein Gebäude oder ein *Quartier* eine Grundsatzentscheidung über die zeitliche Abfolge und Ausprägung unterschiedlicher Sanierungsmaßnahmen zur Realisierung eines Sanierungsziels. Dies beinhaltet im Sinne einer energetischen Sanierung Entscheidungen über die Sanierungstiefe einzelner Sanierungsschritte und die sich daraus ergebende Anzahl an Sanierungsschritten. Auf Grund hoher Investitionskosten und langer Nutzungszeiten kann sich hieraus eine Optimierungsaufgabe im Zusammenhang mit den Betriebskosten ergeben.

Second Life: Mit „Second Life“ oder auch „Second Use“ wird die Verwendung gebrauchter (Antriebs-) Batterien in zweiter Anwendung bezeichnet. Dabei können diese Anwendungen andere als die ursprünglichen sein, z. B. der Wechsel von der mobilen zur stationären Batterie.

Sektorkopplung: bezeichnet die effiziente Nutzung von erneuerbarem Strom in den Sektoren Wärme/Kälte und Verkehr zur Verdrängung fossiler Brennstoffe. Beispiele sind die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen, Wärmepumpen oder auch der elektrische Antrieb von Fahrzeugen. In einem erweiterten Sinn werden auch Verfahren und Konzepte unter den Begriff Sektorkopplung gefasst, die der obigen Definition nicht genügen, aber dennoch der Vernetzung des Energiesystems dienen und Treibhausgasemissionen vermeiden (z. B. Power-to-Chemicals, Methanpyrolyse).

SET-Plan: Der „Strategic Energy Technology Plan“ (SET-Plan) ist eine strategische Aktivität der EU und darüber hinaus beteiligter Staaten mit dem Ziel, unter Einbeziehung der wichtigsten Akteure Energietechnologien zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen unter Berücksichtigung des Klima- und Energiepakets der EU wettbewerbsfähig zu machen. Im SET-Plan werden konkrete Maßnahmen zur Umsetzung der 2030-Ziele der EU und der Prioritäten der Energieunion definiert.

Smart Grid: Das konventionelle Elektrizitätsnetz wird zu einem Smart Grid, wenn es durch Kommunikations-, Mess-, Steuer-, Regel- und Automatisierungstechnik sowie IT-Komponenten aufgerüstet wird. Im Ergebnis bedeutet „smart“, dass Netzzustände in Echtzeit erfasst werden können und Möglichkeiten zur Steuerung und Regelung der Netze bestehen, sodass die bestehende Netzkapazität möglichst vollständig genutzt werden kann.

Smart Building: Ein Gebäude, welches durch Sensortechnik und intelligente Steuerung in der Lage ist, einerseits automatisiert auf die Bedürfnisse und Komfortansprüche der jeweiligen Nutzer zu reagieren und andererseits Schnittstellen bereithält, um flexibel mit einem *Smart Grid* zu interagieren (auch Smart Home). Durch die Vernetzung der gesamten Haustechnik und aller strombetriebenen Haushaltsgeräte kann ein Smart Building zum Komfortgewinn für die Nutzer und gleichzeitig zur Energieeinsparung und Netzstabilisierung beitragen. In der eingesetzten Technologie gibt es Parallelen zur *Industrie 4.0*.

Synthetische Kraftstoffe: Höhere Kohlenwasserstoffe oder andere chemische Energieträger, die über *Power-to-Liquid* bzw. *Power-to-Fuel*-Anlagen produziert werden. Sie dienen als Ergänzung oder Ersatz für fossile Kraftstoffe (Benzin, Diesel, Kerosin und weitere).

Systemdienstleistungen: Systemdienstleistungen sind zusätzliche Dienste zur Sicherstellung eines zuverlässigen und effizienten Netzbetriebs. Bezogen auf das Stromnetz umfassen sie Maßnahmen zur Betriebsführung, Frequenzhaltung, Spannungshaltung und zum Versorgungswiederaufbau.

Technologieoffenheit: Gefördert werden Forschung, Entwicklung und Demonstration für Technologien, die plausibel einen relevanten Beitrag zur Erreichung der energie-

und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung leisten können. Schwerpunktsetzungen innerhalb dieser grundsätzlich offenen Technologieförderung erfolgen mit Blick auf Innovations- und Marktpotenziale sowie Relevanz unterschiedlicher Technologien für die energie- und klimapolitischen Ziele.

Temporary Working Group: Vom *SET-Plan* definierte Gremien mit dem Ziel, Implementation Plans (IP) für jeweilige Key Actions des Integrated SET-Plans zu erarbeiten (bzw. umzusetzen). Deren wichtigste Akteure, u. a. SET-Plan-Staaten, europäische Industrieinitiativen und Forschungsverbände, haben nach der Formulierung der IPs die Folgestrukturen, so genannte Implementierungsgruppen (IGs), konstituiert, die mittelfristig die Verwirklichung von IPs koordinieren sollen. Der Prozess soll unter Berücksichtigung der nationalen Energie- und Klimapläne abgestimmt werden.

Verbundvorhaben: In einem Verbundvorhaben arbeiten mehrere rechtlich eigenständige Partner an einem gemeinsamen Projekt mit einem abgestimmten Ziel zusammen. Sie stellen sich dazu gegenseitig alle notwendigen Informationen und Rechte für die Dauer des Vorhabens zur Verfügung und regeln die Aufteilung von Ergebnissen und ihre Zusammenarbeit in einem Kooperationsvertrag.

Vermaschung: Im vermaschten Netz sind verschiedene Netzknotten miteinander verbunden. So könnten etwa die Start- und Endpunkte eines Strahlennetzes, bei dem die Leitungen von einem Ausgangspunkt zu verschiedenen Endpunkten verlaufen, über weitere Leitungen verbunden werden. Das Übertragungsnetz ist ein Beispiel für ein Stromnetz mit sehr hoher Vermaschung. Im Allgemeinen erhöht eine Redundanz durch Vermaschung die Versorgungssicherheit.

Zirkuläres Wirtschaften: bezeichnet die Schaffung einer stärker kreislauforientierten Wirtschaft, bei der es darum geht, den Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen innerhalb der Wirtschaft so lange wie möglich zu erhalten und möglichst wenig Abfall zu erzeugen. Die zirkuläre Wirtschaft verbindet *Kreislaufwirtschaft*, *Up-/Recycling*, *Ressourcen-* und *Energieeffizienz* sowie *Ressourcenschonung* miteinander. Die Prinzipien des zirkulären Wirtschaftens müssen dabei bereits beim Produktdesign berücksichtigt werden.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|--|
| AC | Wechselstrom (engl. Alternating Current) |
| ACT | Accelerating CCS Technologies (ein ERA-Net) |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| BIM | Bauwerksdatenmodellierung (engl. Building Information Modeling) |
| BIPV | Gebäudeintegrierte Photovoltaik (engl. Building Integrated Photovoltaic) |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMEL | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft |
| BMS | Batteriemanagementsystem |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| CCS | Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung (engl. Carbon Capture and Storage) |
| CCU | Kohlendioxid -Abscheidung und -Nutzung (engl. Carbon Capture and Utilization) |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| COP21 | UN-Klimakonferenz in Paris 2015 (engl. United Nations Framework Convention on Climate Change, 21st Conference of the Parties) |
| CSP | Solarthermisches Kraftwerk (engl. Concentrated Solar Power) |
| D-A-CH | Deutschland, Österreich und Schweiz |
| DBFZ | Deutsches Biomasseforschungszentrum |
| DC | Gleichstrom (engl. Direct Current) |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. |
| EE | Erneuerbare Energien |
| EERA | European Energy Research Alliance |
| EIB | European Investment Bank |
| ERA-Net | Europaweite Zusammenarbeit zwischen nationalen und regionalen Forschungsförderorganisationen bzw. Programmagenturen (engl. European Research Area Network) |
| ESYS | Akademien-Projekt Energiesysteme der Zukunft |
| EU | Europäische Union |
| EURATOM | Europäische Atomgemeinschaft |
| FIZ Karlsruhe | Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur |
| FONA | Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ des BMBF |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| FuEuI | Forschung, Entwicklung und Innovation |
| FuI | Forschung und Innovation |
| FZJ | Forschungszentrum Jülich GmbH |
| G7 | Gruppe der Sieben (Deutschland, Frankreich, Italien, Japan, Kanada, Vereinigtes Königreich Großbritannien und Nordirland, Vereinigte Staaten von Amerika) |
| GWh | Gigawattstunden (1 Million Kilowattstunden) |
| GRS | Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit |
| GW | Gigawatt |
| HGF | Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V. |
| HGÜ | Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (auch HVDC, engl. High Voltage Direct Current) |
| Horizon 2020 / | |
| Horizon Europe | Europäische Forschungsrahmenprogramme |
| HTSL | Hochtemperatursupraleitung |
| IAEO | Internationale Atomenergie-Organisation |
| IBP | Fraunhofer-Institut für Bauphysik |
| IEA | Internationale Energieagentur |
| IEE | Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik |

| | |
|-------------|---|
| IG | Implementierungsgruppe (zuvor Temporary Working Group – TWG) |
| IGHD | Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnologie |
| IPP | Max-Planck-Institut für Plasmaphysik |
| IRENA | Internationale Organisation für erneuerbare Energien |
| ISE | Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme |
| ITER | International Thermonuclear Experimental Reactor (ein Kernfusionsreaktor und Forschungsprojekt) |
| IWES | Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| KKW | Kernkraftwerk |
| KMU | Kleine und mittlere Unternehmen |
| kWh | Kilowattstunde |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| LIKAT | Leibniz-Institut für Katalyse |
| LKW | Lastkraftwagen |
| MI | Mission Innovation |
| MPG | Max-Planck-Gesellschaft |
| MPI CEC | Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion |
| MPIKG | Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung |
| NECP | Der integrierte nationale Energie- und Klimaplan (engl. National Energy and Climate Plan – NECP) |
| NIP 2 | Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Phase 2 |
| NKS Energie | Nationale Kontaktstelle Energie beim Projektträger Jülich |
| OECD / NEA | Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung / Nuclear Energy Agency |
| ORC | Organic Rankine Cycle |
| PEM | Polymerelektrolytbrennstoffzelle |
| PIK | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung |
| POF | Programmorientierte Förderung innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren |
| PtJ | Projektträger Jülich |
| PtX | Umwandlung von Elektrizität in andere Energieträger (Power-to-X) |
| PV | Photovoltaik |
| SET-Plan | Europäischer Strategieplan für Energietechnologien (engl. European Strategic Energy Technology Plan) |
| SINTEG | Schaufenster intelligente Energie Digitale Agenda für die Energiewende |
| SOFC | Festoxidbrennstoffzelle |
| TCP | Programm zur technologischen Zusammenarbeit im Rahmen der Internationalen Energieagentur (engl. Technology Collaboration Programme) |
| TRL | technologischer Reifegrad (engl. Technology Readiness Level) |
| TWG | Temporary Working Group (jetzt Implementierungsgruppen – IG) |
| TWh | Terawattstunden (1 Milliarde Kilowattstunden) |
| UMSICHT | Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik |
| ZSW | Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg |

