



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Konsultationsprozess für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

**- Zusammenfassung der Expertenempfehlungen
und Positionspapiere aus den Bundesländern
sowie aus Wirtschaft und Wissenschaft -**

18.05.2018

Inhalt

1.	Hintergrund.....	4
2.	Übergreifende Fragestellungen und Querschnittsanalyse.....	7
2.1	Einführung.....	7
2.2	Förderpolitische Schwerpunktsetzung.....	8
2.3	Förderrechtlich-administrative Empfehlungen.....	10
2.4	Technikübergreifende Forschungsfelder.....	12
3.	Technologieentwicklung.....	15
3.1	Windenergie.....	15
3.2	Photovoltaik.....	20
3.3	Geothermie.....	25
3.4	Wasserkraft und Meeresenergie.....	30
3.5	Solarthermische Kraftwerke.....	31
3.6	Konventionelle thermische Kraftwerke.....	36
3.7	Motoren und Turbinen.....	41
3.8	Brennstoffzellen und Wasserstoff.....	46
3.9	Energieoptimierte Gebäude (ohne Quartiere).....	52
3.10	Energieoptimierte Quartiere.....	56
3.11	Wärmetransport, -verteilung und -speicherung.....	63
3.12	Niedertemperatur-Solarthermie.....	69
3.13	Bioenergie.....	72
3.14	Industrielle Abwärmenutzung.....	78
3.15	Prozess- und Querschnittstechnologien zur Energieeffizienz und CO ₂ -Reduktion in der Industrie.....	82
3.16	Energiespeicher: Elektrisch, elektrochemisch und Elektromobilität.....	91
3.17	Energiespeicher: Mechanisch, Power-Heat-Power.....	98
3.18	Energiespeicher: Thermisch und thermo-chemisch.....	100
3.19	Wasserstoffherzeugung und -speicherung, inklusive geologischer Speicher.....	105
3.20	Sektorkopplung: Power-to-Gas, Power-to-Heat, Power-to-Liquids, Power-to-Chemicals.....	113
3.21	CO ₂ -Technologien.....	120
3.22	Stromnetze.....	126
3.23	Systemanalyse.....	131
3.24	IKT und Digitalisierung.....	136

4.	Quellenverzeichnis	141
A	Bundesländer.....	141
B	Landesagenturen.....	141
C	Verbände.....	141
D	Unternehmen.....	142
E	Kompetenzcluster, Plattformen und sonstige Verbände.....	142
F	Akademien und Forschungsorganisationen.....	142
G	Forschergruppen.....	142
H	Forschungsnetzwerke.....	143
I	Leitprojekte Energieforschung.....	143

Die Erstellung der Publikation erfolgte in Zusammenarbeit mit
BINE Informationsdienst, Uwe Milles

1. Hintergrund

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) ist ressortübergreifend und federführend für die Erarbeitung der Energieforschungsprogramme der Bundesregierung zuständig. Zur Vorbereitung des 7. Energieforschungsprogramms hat das Ministerium im Dezember 2016 einen öffentlichen Konsultationsprozess gestartet, der bis zum Jahresende 2017 lief. Der Prozess, der von der Energiewende-Plattform Forschung und Innovation des BMWi begleitet wurde, setzte sich aus den Bausteinen

- Expertenempfehlungen aus den Forschungsnetzwerken Energie¹
- Onlineumfrage unter den Mitgliedern der Forschungsnetzwerke und weiterer Akteure

sowie

- Positionspapieren gesellschaftlicher Akteure (Bundesländer, Verbände, Unternehmen usw.)

zusammen. In derzeit sieben technologiespezifischen Forschungsnetzwerken, die das BMWi ab 2015 sukzessive initiiert hat, sowie im Rahmen des Statusseminars Brennstoffzelle, haben sich Arbeitsgruppen mit den energiepolitischen und energietechnischen Herausforderungen sowie dem daraus abzuleitenden Forschungsbedarf beschäftigt. Die rund 2.800 Mitglieder aus Forschungseinrichtungen, Universitäten und Unternehmen haben Expertenempfehlungen erarbeitet, die zum Jahresende 2017 veröffentlicht wurden. Parallel dazu starteten in der zweiten Jahreshälfte 2016 zwei strategische Leitprojekte, die sich mit den für die Energiewende maßgeblichen Technologien sowie den Trends und Perspektiven der Energieforschung befassen. Im Rahmen eines Vorhabens startete im März 2017 eine Onlineumfrage unter den Mitgliedern der Forschungsnetzwerke und weiteren Akteuren aus der Energieforschung zum Forschungsbedarf sowie den nationalen und internationalen Marktpotenzialen von Energietechniken. An der Umfrage haben sich 760 von insgesamt 2.965 Experten (rd. 26 %) beteiligt. Die Fragen betrafen unter anderem die Einschätzung zum Forschungsbedarf in einzelnen Forschungsbereichen, wie z. B. erneuerbare Energien, Sektorkopplung oder Energiespeicher, den daraus resultierenden öffentlichen Forschungsbedarf und die Rolle der Digitalisierung. Einen weiteren Schwerpunkt bildeten Förderformate, wie z. B. Einzel-, Verbund- und Großvorhaben, integrierte Förderprogramme, die von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Entwicklung reichen, sowie internationale Forschungsprojekte. Auch die Übertragung von Forschungsergebnissen in die praktische Anwendung wurde abgefragt. Dabei ging es neben der von den Teilnehmern erwarteten Zeitspanne bis zu einer kommerziellen Verwertung auch um die Hemmnisse.

Ergänzend wurde der Konsultationsprozess im Mai 2017 auf einem Festakt zum 40jährigen Bestehen der Energieforschung einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt. Das BMWi hat dabei Vertreter der Bundesländer sowie von Verbänden, Unternehmen und weiteren Interessengruppen eingeladen, sich mit eigenen Beiträgen an der zukünftigen Ausrichtung der Energieforschung des Bundes zu beteiligen. Diesem Aufruf sind neben den bereits erwähnten Forschungsnetzwerken und den im Rahmen der Onlineumfrage befragten Akteuren folgende Interessenvertreter (Stand: 9. Feb. 2018) gefolgt:

¹ In den Forschungsnetzwerken Energie arbeiten Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft in folgenden sieben Fachbereichen zusammen: Energiewendebauen, Systemanalyse, Stromnetze, Erneuerbare Energien, Energie in Industrie und Gewerbe, Flexible Energieumwandlung und Bioenergie.

Bundesländer

- Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland (gemeinsames Positionspapier)
- Norddeutsche Wissenschaftsministerkonferenz der Länder Schleswig-Holstein, Bremen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Hamburg (NWMK)
- Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen
- Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst / Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr
- Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft

Landesagenturen

- e-mobil BW GmbH, Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg
- Energieforschungsverbund Hamburg (EFH) und Cluster erneuerbare Energien Hamburg (EEHH)

Verbände

- Biotechnologie-Industrie-Organisation Deutschland e. V. (BIO Deutschland)
- Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI)
- Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e. V. (BDL)
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (BDEW)
- Bundesverband Energiespeicher e. V. (BVES)
- Bundesverband Geothermie e. V. (BVG)
- Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e. V. (bitkom)
- Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI)

Unternehmen

- STEAG GmbH
- Umicore AG und Co. KG

Kompetenzcluster, Plattformen und sonstige Verbände

- FVEE ForschungsVerbund Erneuerbare Energien
- Hydrogen Power Storage und Solutions East Germany e. V. (HYPOS)
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE)
- Positionspapier Start-ups
- Thüringer erneuerbare Energien Netzwerk (ThEEN) e. V.
- Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende, Vereinigung Deutscher Wissenschaftler e. V.

Akademien und Forschungseinrichtungen

- Deutsche Wissenschaftsakademien (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
- Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V.

Forschergruppen

- Technische Universität Berlin

Dieser Bericht dokumentiert die Ergebnisse der oben genannten Bausteine des Konsultationsprozesses. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst übergeordnete Vorschläge für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung dargestellt. Dabei handelt es sich um forschungspolitische Empfehlungen, förderrechtliche und administrative Anregungen sowie Vorschläge für neue, technikübergreifende Forschungsbereiche. In Kapitel 3 folgt eine technikspezifische Dokumentation der eingegangenen Expertenempfehlungen und Positionspapieren. Diese hat zum Ziel, die zentralen Forschungsbereiche und ihre jeweiligen Schwerpunkte darzustellen. Die Themengebiete reichen von der Energiebereitstellung über die Energieverteilung und -speicherung bis zur Energienutzung. Für jeden der mehr als 20 Technikbereiche werden die eingereichten Vorschläge auf vier bis sechs Seiten zusammengefasst. Dies beinhaltet auch, jeweils die energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung, die Entwicklungsziele, den Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden zu benennen. Rückblickend werden die inhaltlichen Schwerpunkte der verschiedenen Technikbereiche im laufenden, 6. Energieforschungsprogramm noch einmal erwähnt.

Die in Kapitel 2 und 3 dokumentierten Feststellungen und Vorschläge fassen die Expertenempfehlungen und Positionspapiere der Akteure aus den beteiligten Institutionen zusammen. Diese entsprechen nicht zwangsläufig der Meinung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) und des Projektträgers Jülich. Die Darstellung der eingereichten Expertenempfehlungen und Positionspapiere erfolgt wertfrei, d. h., die Vorschläge und Anregungen werden unabhängig von der möglichen Realisierbarkeit zusammenfassend dokumentiert. Auch das industrie- und forschungspolitische Gewicht der beteiligten Institutionen (z. B. Einzelunternehmen vs. Verband) spielen bei der Darstellung der Positionen keine Rolle.

2. Übergreifende Fragestellungen und Querschnittsanalyse

2.1 Einführung

Die für den Konsultationsprozess vorgelegten Dokumente enthalten neben technikspezifischen Empfehlungen, die in Kapitel 3 beschrieben werden, auch vielfältige übergreifende Vorschläge für das neue, 7. Energieforschungsprogramm. Diese lassen sich grob in folgende Bereiche einteilen:

- förderpolitische Schwerpunktsetzung
- förderrechtlich-administrative Empfehlungen
- technikübergreifende Forschungsfelder

Deren Zuordnung erfolgt nach folgenden Kriterien: Beiträge zur förderpolitischen Schwerpunktsetzung beschreiben die Leitlinien und Ziele des Forschungsprogramms. Sie bilden – losgelöst von Einzeltechniken und potenziellen Förderverfahren – den Rahmen des Programms. In diese Kategorie gehören z. B. die Empfehlung, das Niveau der Förderbudgets mindestens zu halten oder zu erhöhen sowie die Forderung nach einer technologieoffenen und -neutralen Forschungsförderung. Die Gruppe der förderrechtlich-administrativen Empfehlungen umfasst im weiteren Sinne Vorschläge zur Förderfähigkeit spezifischer Maßnahmen, wie z. B. die verstärkte Förderung von Demonstrationsprojekten und der Markteinführung sowie Empfehlungen für ein vereinfachtes und verkürztes Antragsverfahren. Bei den technikübergreifenden Forschungsfeldern handelt es sich im Wesentlichen um Forschungsgebiete, die in verschiedenen technischen Anwendungen eine Schlüsselfunktion einnehmen, um den angestrebten Umbau der Energieversorgung zu ermöglichen. Dabei geht es vorrangig um Themengebiete, die im laufenden, 6. Energieforschungsprogramm gar nicht, in deutlich geringerem Umfang oder mit einer anderen Schwerpunktsetzung gefördert wurden. Hier sind z. B. Digitalisierung, Sektorkopplung, Akzeptanzfragen und sogenannte Reallabore zu nennen.

Nicht immer lassen sich einzelne Expertenempfehlungen und Positionspapiere eindeutig den drei oben genannten Bereichen zuordnen. Beispielsweise können Forderungen nach einer verstärkten Förderung von Demonstrations- und Pilotanlagen sowohl im förderpolitischen als auch förderrechtlichen Sinne interpretiert werden. Die Einteilung basiert auf dem jeweiligen Kontext der Forderungen. So werden die Demonstrations- und Pilotanlagen meist im Zusammenhang mit der Lösung anwendungsbezogener Probleme genannt, was primär förderrechtlich-administrative Programmanpassungen – im Sinne der Frage „Was ist zuwendungsfähig?“ – erfordert. Bei der Zuordnung zu technikübergreifenden Forschungsfeldern standen v. a. der Querschnittscharakter der Anwendungen sowie die Forderung nach einer herausgehobenen Stellung im neuen Forschungsprogramm im Mittelpunkt.

In den folgenden Abschnitten 2.2 bis 2.4. werden die vorliegenden Expertenempfehlungen und Positionspapiere gemäß der oben genannten Einteilung zusammenfassend dargestellt. Dabei orientiert sich die Reihenfolge der genannten Punkte an der Anzahl der Nennungen, d. h. die am häufigsten genannten Aspekte stehen jeweils an oberster Stelle.

2.2 Förderpolitische Schwerpunktsetzung

□ Wettbewerbs- und Exportorientierung

In vielen Positionspapieren äußern die Verfasser, dass sich die bisherige Forschungsförderung zu stark an nationalen Erfordernissen orientiere.² Sie regen deshalb an, die Vergabe von Forschungsmitteln verstärkt an deren globales Innovationspotenzial und Beitrag zur Stärkung der Marktposition heimischer Unternehmen im internationalen Wettbewerb auszurichten. Neben der Sicherung von Arbeitsplätzen heben sie Multiplikatoreffekte hervor, die sich durch die weltweite Verbreitung energieeffizienter Technologien erzielen lassen. Nach Ansicht der Akteure setzt der Exporterfolg voraus, dass die jeweiligen Industrien und Wertschöpfungsketten in Deutschland vorhanden sind und die Techniken hier eingesetzt werden sollten³. Eng verknüpft mit der Wettbewerbsorientierung seien darüber hinaus EU-weite und internationale energiepolitische Zielsetzungen, die als bedeutsam für die nationalen Forschungsschwerpunkte erachtet werden⁴.

□ Technologieoffene und -neutrale Förderung

Eine große Zahl der Akteure unterstützt die bisher in der Energieforschung praktizierte technologie-neutrale und themenoffene Förderung⁵. Sie erachten sowohl die Grundlagenforschung als auch die anwendungsorientierte Forschung als notwendig, um die vielfältigen Herausforderungen der Energiewende zu meistern. Die Breite potenzieller Forschungsfelder trage dazu bei, einen vorzeitigen Ausschluss von Lösungsansätzen zu vermeiden⁶. Im Hinblick auf umweltpolitische Ziele wird die Berücksichtigung der „Sustainable Development Goals“ der UN, der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie und des Prinzips der planetaren Grenzen in der Forschungsförderung angemahnt. Darüber hinaus sollten die Themenfelder Klimawandel, Investitionen und Finanzmärkte mitbedacht werden, die Einfluss auf die Energiebereitstellung und -nutzung haben⁷. In diesem Zusammenhang wird z. B. die Nutzung erneuerbarer Energien in den Ländern des globalen Südens genannt.

Hinsichtlich der politischen Rahmenbedingungen fordern einige Akteure eine langfristige und stabile Ausrichtung, die unabhängig von aktuellen politischen Opportunitäten sein sollte⁸.

□ Beteiligungsmöglichkeiten von jungen Unternehmen und KMU

In vielen Positionspapieren sprechen sich die Akteure dafür aus, mehr junge Unternehmen und KMUs am Energieforschungsprogramm zu beteiligen⁹. Einige Verfasser untermauern diese Bewertung mit konkreten Beispielen: Sie schätzen die üblichen Bewilligungszeiträume von mehr als sechs Monaten als Hemmnis ein¹⁰. Für junge Unternehmen werde es durch unkalkulierbare Bewilligungszeiten schwer, eine zeitliche Synchronisation mit Investorengeldern zu gewährleisten. Aus diesem Grund fordern die Akteure verbindliche Bewilligungsfristen von wenigen Monaten.

² [A1]; [C2]; [C4]; [C7]; [D1]; [E1]; [E7]; [F1]; [F2]; [F3]

³ [C8]; [E1]; [H6]

⁴ [A1]; [C2]; [D1]; [E1]; [F1]; [F2]; [F3]

⁵ [A1]; [A4]; [A5]; [C2]; [C4]; [C8]; [D1]; [E6]; [F1]

⁶ [D1]

⁷ [E7]

⁸ [C2]; [C8]; [E1], [C4]

⁹ [A4]; [A5]; [C1]; [C7]; [E1]; [E5]; [E6]; [F1]; [I1]

¹⁰ [C1]; [C7]; [E5]; [I1]

Viele junge Unternehmen und KMU verfolgen das Ziel, ihre Geschäftstätigkeit möglichst zügig auszuweiten. Im Hinblick darauf empfehlen einzelne Akteure, Investitionen verstärkt in der Förderung zu berücksichtigen¹¹.

Die im Regelwerk vorgeschriebene Bonitätsprüfung ist nach Ansicht der Akteure eine weitere Hürde für junge Unternehmen. Sie regen an, vorläufige Förderzusagen zu ermöglichen. Diese sollen daran gebunden sein, weiteres privates Kapital einzuwerben¹². Auch die Förderquoten sollten den zulässigen Rahmen ausschöpfen. In der Folge sollten diese dann meilensteinabhängig unter Berücksichtigung der Technik- und Marktreife angepasst werden.

□ Förderbudgets und Mittelverteilung

Für eine steigende oder zumindest gleichbleibende Mittelbereitstellung im neuen Energieforschungsprogramm sprechen sich eine große Zahl der Positionspapiere aus¹³. Die Verfasser halten eine Steigerung der Mittel vor allem deswegen für notwendig, weil in Deutschland im Vergleich zu anderen OECD-Ländern der Anteil staatlich finanzierter Forschung und Entwicklung (FuE) in der Wirtschaft zu niedrig ausfalle¹⁴.

Einige Teilnehmer des Konsultationsprozesses sprechen sich für eine dedizierte Mittelverteilung in einzelnen Themenbereichen aus. Sie schlagen eine zusätzliche Mittelbereitstellung von 100 Mio. EUR/a für die Digitalisierung¹⁵, eine Reservierung von etwa 10 % des Förderbudgets für junge Unternehmen¹⁶ und eine stärkere Förderung der Wirtschaft im Rahmen der Projektförderung¹⁷ vor. Ergänzend fordern die Akteure, für elementare Bausteine der Energiewende technologiespezifische Budgets auszuweisen, wie z. B. Windenergie, Photovoltaik und Speicherentwicklung¹⁸.

□ Organisation der Energieforschung

In einer Reihe von Positionspapieren empfehlen die Akteure, im Energiebereich die Forschungsförderung des Bundes sowohl national auf Ressortebene als auch auf EU-Ebene besser aufeinander abzustimmen¹⁹. Nach ihrer Wahrnehmung sei die nationale Förderlandschaft zu kleinteilig und zersplittert²⁰, was sich in einer mangelnden Verzahnung und themenübergreifenden Koordination niederschläge. Sie schlagen vor, für eine stärkere Koordinierung der Forschungsziele und -schwerpunkte eine gemeinsame Geschäftsstelle der mit Energieforschung befassten Ministerien einzurichten²¹.

¹¹ [E5]

¹² [C7]; [E5]

¹³ [A1]; [A2]; [C2]; [C4]; [C7]; [C8]; [E5]; [F2]

¹⁴ [C2]; [C8]

¹⁵ [C7]

¹⁶ [E5]

¹⁷ [C8]

¹⁸ [A2]

¹⁹ [C2]; [C4]; [C8]; [E7]; [F1]; [F2]

²⁰ [C2]; [C8]; [E7]

²¹ [C4]

□ Technologiespezifische Förderschwerpunkte und -budgets

Ergänzend zu der o. g. technologischen Offenheit und Neutralität sprechen sich die Verfasser einiger Positionspapiere für eine technologiespezifische Förderung aus. Diese sollte das Ziel verfolgen, Schlüsseltechnologien in den Fokus zu nehmen, um sie schnell in den Markt zu bringen²². Die Auswahl der Themen und die Ausgestaltung der Programme setze die umfassende und frühzeitige Einbindung der Industrie voraus²³.

□ Sonstige förderpolitische Empfehlungen

Bei den im Folgenden zusammenfassend dargestellten Hinweisen handelt es sich zum Teil um grundlegend neue Elemente in der Forschungsförderung, die jedoch nur wenige Akteure benannt haben. Da sie vielfach jedoch Aspekte ansprechen, die für einen größeren Kreis von Interesse sein könnten, werden sie an dieser Stelle vorgestellt.

Vertreter der Wirtschaft haben die Forderung nach einer steuerlichen Forschungsförderung erhoben²⁴, die jedoch unabhängig von der Energieforschung im Steuerrecht zu verankern sei. Weiterhin sind hier wettbewerbliche Anreizsysteme für strategische Partnerschaften von Wissenschaft und Industrie zu nennen²⁵. Diese sollen in einem frühen Stadium dazu beitragen, eine marktorientierte Entwicklung und damit eine Verkürzung der Innovationszyklen zu unterstützen. Andere Akteure regen an, Forschungsk Kooperationen über Landes- und Branchengrenzen hinweg zu ermöglichen, um interdisziplinäre Forschungsarbeiten zu erleichtern²⁶, gesellschaftlichen Interessengruppen und regionalen Forschungsclustern den Zugang zu Fördermitteln zu ermöglichen²⁷ und die Anforderungen der Industrie stärker bei der Ausgestaltung des Forschungsprogramms zu berücksichtigen²⁸.

2.3 Förderrechtlich-administrative Empfehlungen

□ Demonstrationsprojekte und Pilotanlagen

In vielen Expertenempfehlungen und Positionspapieren fordern die Verfasser, im Rahmen des neuen Energieforschungsprogramms mehr Fördermittel für Demonstrationsprojekte und Pilotanlagen vorzusehen²⁹. Als Gründe dafür führen sie die zunehmende Komplexität der Energieversorgungsstrukturen und den als zu langsam empfundenen Übergang in die Märkte an. Eine höhere Anzahl von Demonstrations- und Pilotprojekten werde auch zur Validierung von Simulationswerkzeugen benötigt. Diese lasse sich nur im Rahmen einer praxisnahen Erprobung durchführen. Besonders in der chemischen Verfahrenstechnik seien Pilotanlagen unverzichtbar, um die im Labor verifizierten Verfahren im größeren Maßstab zu erproben. Die Notwendigkeit einer Förderung ergebe sich aus den hohen Kosten für solche Anlagen und des damit einhergehenden technischen und wirtschaftlichen Risikos.

²² [A2]; [C1]; [C2]; [C7]; [C8]

²³ [C8]

²⁴ [C2]; [C4]

²⁵ [F3]

²⁶ [C8]; [D2]; [F2]

²⁷ [A5]; [E6]; [E7]

²⁸ [C2]; [C8]

²⁹ [A1]; [A2]; [A4]; [A5]; [B2]; [C2]; [C6]; [C8]; [D2]; [E6]; [F1]; [F2]; [F3]; [H2]; [H7]; [H9]; [H10]; [I1]

□ Technische Reife

Viele Akteure sprechen sich neben o. g. Forderung dafür aus, bei der technischen Reife eine breitere Palette von Projekten als im laufenden, 6. Energieforschungsprogramm zu fördern. Neben grundlagenbasierten und anwendungsnahen Forschungsarbeiten seien auch experimentelle Entwicklungen und die Markteinführung wichtig³⁰. Auch ein höheres Maß an interdisziplinärer Zusammenarbeit sei in diesem Zusammenhang notwendig.

□ Projektstruktur

In einigen Positionspapieren sprechen sich die Verfasser für mehr Großprojekte innerhalb der Energieforschung aus. Dabei verweisen sie auf die Erfahrungen der SINTEG- und KOPERNIKUS-Initiativen³¹. Großprojekte beinhalten ein breites Spektrum adressierter Fragestellungen, die von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung und Demonstration reichen. Damit wäre es generell möglich, systemübergreifende Fragestellungen umfassend zu bearbeiten und Wertschöpfungsketten komplett abzudecken. Andererseits sehen die im Rahmen der Onlineumfrage des ifo-Instituts befragten Mitglieder der Forschungsnetzwerke die Großverbundvorhaben kritischer. Sie schätzen den Nutzen im Verhältnis zum Aufwand deutlich geringer ein als bei kleineren Vorhaben. Als Gründe nennen sie unter anderem Projektkoordination, Partnerakquise, Harmonisierung von Einzelinteressen und das Aushandeln einer Kooperationsvereinbarung als große Herausforderungen³².

Ein neuer Vorschlag für ein weiteres Strukturelement im neuen, 7. Energieforschungsprogramm betrifft die Kleinprojekte. Bei denen sollen das Antragsverfahren gestrafft und die Berichtspflichten reduziert werden³³. Kleinprojekte seien dafür gedacht, kurzfristig spezielle technisch-wissenschaftliche Fragestellungen zu klären.

□ Antragsverfahren, Förderquoten und sonstiges

Unabhängig von den o. g. Hemmnissen für die Beteiligung junger Unternehmen und KMU kommentieren zahlreiche Verfasser von Positionspapieren das bisherige Antrags- und Bewilligungsverfahren. Sie halten u. a. den Zeitraum von der Vorlage einer Projektskizze bis zur Bewilligung für zu lang³⁴. Stattdessen schlagen sie verbindliche Bewilligungszeiträume und vereinfachte Nachweispflichten bei der Vorkalkulation vor. Auch das Instrument der unverbindlichen Inaussichtstellung sei geeignet, einen schnelleren Projektstart zu ermöglichen.

Darüber hinaus schlagen sie eine Senkung von Fördereintrittshürden (z. B. Fördermittelgrenzen, die Ausweitung antragsberechtigter Akteure im Energieforschungsprogramm), die Schaffung von Anreizen und Instrumenten zur Risikofinanzierung für KMU, niederschwellige Beratungsangebote sowie die Förderfähigkeit der Projektvorbereitung und -koordination vor³⁵.

³⁰ [A1]; [A2]; [A5]; [B2]; [C2]; [C7]; [C8]; [D2]; [E6]; [F1]; [F3]; [H6]; [I1]

³¹ [C2]; [C9]

³² [I1]

³³ [F1]

³⁴ [C8]; [D2]; [E5]; [F1]; [F2]; [I1]

³⁵ [A4]; [E5]

2.4 Technikübergreifende Forschungsfelder

□ Sektorkopplung

In vielen Expertenempfehlungen und Positionspapieren bewerten die Akteure die Sektorkopplung als grundlegend für die technikübergreifenden Forschungsfelder im neuen Energieforschungsprogramm³⁶. Ziel der Forschung solle demnach die verbesserte Integration und Nutzung erneuerbarer Energien sein. Die sei im Vergleich zum laufenden, 6. Energieforschungsprogramm notwendig, da der Ausbau von Stromerzeugungstechniken auf der Basis regenerativer Energiequellen in den letzten Jahren an Dynamik gewonnen habe. Durch die Sektorkopplung könne der Strommarkt mit dem Wärme-, Verkehrs- und Industriesektor verbunden werden, sodass fossile Energieträger durch erneuerbare Energien substituiert werden könnten. Neben der dadurch erzielbaren CO₂-Minderung werde die Flexibilität des Energiesystems gesteigert, indem Strom direkt genutzt oder in Wasserstoff, Methan, synthetische Kraftstoffe oder chemische Grundstoffe umgewandelt werden könne.

□ Digitalisierung

Zahlreiche Akteure sprechen sich dafür aus, die Digitalisierung der Energieversorgung im neuen, 7. Energieforschungsprogramm stärker zu fördern³⁷. Durch die Zunahme der fluktuierenden Stromerzeugung, die bei einer vermehrten Sektorkopplung und eines vermehrten Einsatzes solarthermischer Anlagen mit einer schwankenden Wärmebereitstellung einhergehe und der wachsenden Zahl an Energieanbietern und ihrer großen räumlichen Verteilung (Dezentralisierung), gewinne die automatisierte Verknüpfung von Angebot und Nachfrage an Bedeutung. Ein lokaler oder regionaler Ausgleich könne neben der zeitlichen Synchronisation dazu beitragen, übergeordnete Netzebenen zu entlasten und den erforderlichen Netzausbau zu minimieren. Mit der Weiterentwicklung von Automatisierungstechniken, der Anlagensteuerung über das Internet und Verfahren zur automatisierten, massentauglichen Abwicklung von Liefertransaktionen ergäben sich neue Geschäftsmodelle, die insbesondere neuen Anbietern den Einstieg in die Energiewirtschaft ermöglichen (s. u. „Geschäftsmodelle“). Mit der Verbreitung digitaler Verfahren in der Energieversorgung gewännen aber auch Fragen der Betriebs- und Datensicherheit sowie des Datenschutzes an Bedeutung, für die zuverlässige Verfahren entwickelt werden müssten.

□ Sozialwissenschaftliche Forschungsarbeiten und Akzeptanz

Angesichts der wachsenden Zahl von Akteuren im Energiesystem sowohl auf der Angebots- als auch der Nachfrageseite sprechen sich zahlreiche Akteure in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren für eine Stärkung der sozialwissenschaftlichen Forschung aus³⁸. Die Arbeiten verfolgen das Ziel, das potenzielle Verhalten der unterschiedlichen Marktteilnehmer sowie ihre jeweiligen Beweggründe und strategischen Ziele zu ermitteln. Die Informationen könnten zu einem besseren Verständnis beitragen, welche Faktoren sich förderlich bzw. hemmend auf die Umsetzung der Energiewende auswirken. Dabei spielten auch Fragen der Technikakzeptanz eine wichtige Rolle, da neue Entwicklungen nur dann ihren Weg in den Markt fänden, wenn sie als nutzbringend wahrgenommen würden.

³⁶ [A1]; [A2]; [A4]; [A5]; [B1]; [B2]; [C2]; [C3]; [C4]; [C8]; [D1]; [E3]; [E6]; [F1]; [F2]; [F3]; [H1]; [H2]; [H7]; [H8]; [H9]; [H10]; [I1]

³⁷ [A1]; [A2]; [A4]; [B2]; [C2]; [C4]; [C7]; [E6]; [E7]; [F1]; [F2]; [F3]; [H2]; [H7]; [H8]; [H9]

³⁸ [A1]; [A2]; [B2]; [C4]; [C7]; [D1]; [E7]; [F1]; [F2]; [F3]; [H3]; [H7]; [I1]

□ Lebenszyklusanalysen, Recycling und Nachhaltigkeit

Viele Akteure sprechen sich dafür aus, die Rolle von Lebenszyklusanalysen, Recycling und Nachhaltigkeit stärker in den Fokus zu nehmen³⁹. So sollen Lebenszyklusanalysen dazu beitragen, die Auswirkungen und Gesamtkosten neuer Technologien im Voraus zu ermitteln. Zum Thema Recycling werden als Beispiele exemplarisch Rotorblätter von Windenergieanlagen, ausgediente Lithium-Ionen-Batterien sowie wichtige Industrierohstoffe genannt. Die Forderung nach verstärkten Nachhaltigkeitsbetrachtungen ist hingegen eher von allgemeiner Natur.

□ Regulatorischer Rahmen

Mehrere Expertenempfehlungen und Positionspapiere thematisieren den regulatorischen Rahmen, dessen Auswirkungen und Weiterentwicklung erforscht werden sollen⁴⁰. Die Notwendigkeit einer wissenschaftlichen Analyse des Rechtsrahmens und des Energiemarktdesigns wird u. a. mit dem Beispiel der ungleichen Belastung verschiedener Energieträger mit Abgaben und Umlagen begründet. Diese seien ein Hemmnis für die Entwicklung und den Einsatz unterschiedlichster Sektorkopplungstechnologien⁴¹. Systemanalytische Arbeiten könnten dazu beitragen, die Wirkung unterschiedlicher rechtlicher Rahmensetzungen im Zusammenspiel mit anderen Faktoren zu bewerten.

□ Reallabore und Experimentierklauseln

Die zunehmende Komplexität des Energiesystems und die sich aus der Digitalisierung ergebenden Steuerungsmöglichkeiten erfordern nach Ansicht vieler Akteure die Einrichtung sogenannter Reallabore. In denen können neue Techniken, Verfahren und Geschäftsmodelle in einem größeren Kontext erprobt werden⁴². Durch die Anwendung von Experimentierklauseln sollten rechtliche Rahmenbedingungen gelockert werden, um die Erprobung innovativer Entwicklungen in einem praxisnahen Umfeld zu ermöglichen.

□ Produktionsforschung

Weitere Anregungen für ein technikübergreifendes Forschungsfeld betreffen den Ausbau der Produktionsforschung⁴³. Viele Akteure der Expertenempfehlungen und Positionspapiere sehen Forschungsbedarf u. a. im Bereich einer nationalen Stromspeicherproduktion sowie bei neuen Anlagenkonzepten für die Herstellung innovativer Photovoltaikmodule und Brennstoffzellensystemen. Neben Prozessen für die Herstellung energietechnischer Anlagen spiele die Produktionsforschung auch in der industriellen Fertigung eine große Rolle, da gerade in der energieintensiven Industrie durch neue und effizientere Verfahren viel Energie eingespart werden könne. Diesen Förderbereich adressiert v. a. das Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe in seinen Expertenempfehlungen⁴⁴.

³⁹ [A5]; [B2]; [D1]; [D2]; [E4]; [E6]; [F2]; [F3]; [H1]; [H2]; [H3]; [H6]; [H8]; [I1]

⁴⁰ [A1]; [A2]; [A4]; [B2]; [C4]; [C7]; [C8]; [D1]; [E7]; [H2]; [I1]

⁴¹ [C4]; [C9]; [H9]

⁴² [A1]; [A4]; [B2]; [C2]; [C4]; [C8]; [E5]; [E7]; [F1]; [F2]

⁴³ [A1]; [E1]; [E4]; [E6]; [F3]; [H2]; [H5]; [H6]; [H10]

⁴⁴ [H2]

□ Rohstoffversorgung und Materialforschung

In einer ganzen Reihe von Positionspapieren thematisieren die Verfasser die Sicherung der Rohstoffversorgung⁴⁵. Dabei spielen insbesondere die für die Energiewende kritischen Rohstoffe, wie beispielsweise Seltene Erden, eine Rolle. Rohstoffforschung soll demnach zu einer nachhaltigen und sicheren Versorgung beitragen, während mithilfe der Materialforschung neue, kostengünstigere, umweltverträglichere und besser verfügbare Werkstoffe entwickelt werden sollen.

□ Geschäftsmodelle

Einige Akteure befürworten, im Zusammenhang mit der steigenden Digitalisierung der Energieversorgung die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle im neuen Energieforschungsprogramm zu verankern⁴⁶. Als Beispiele nennen sie die intelligente Verknüpfung von Energieangebot und -nachfrage über entsprechende Dienstleistungen, die Kopplung verschiedener Erzeugungsanlagen zu virtuellen Kraftwerken sowie Verfahren zur Ladesteuerung und zur Regelleistungsbereitstellung durch Elektrofahrzeuge. Der Einsatz innovativer informationstechnischer Verfahren ermögliche es neuen Marktteilnehmern, sich an der Energieversorgung zu beteiligen.

□ Standardisierung und Normung

In einigen Expertenempfehlungen und Positionspapieren sprechen sich die Akteure dafür aus, im neuen, 7. Energieforschungsprogramm Standardisierungs- und Normungsaktivitäten zu fördern⁴⁷. So seien, z. B. für die Anbindung erneuerbarer Energieanlagen, die Charakterisierung neuer PV-Zell- und Modultechnologien sowie deren Sicherheit, neue IKT-Infrastrukturen für die Systemsteuerung sowie den Einsatz von Stromspeichern, Standardisierungsarbeiten erforderlich. Die Verfasser hoffen, dass BMWi oder PtJ die Identifikation geeigneter Gremien und Ansprechpartner unterstützen können.

⁴⁵ [B2]; [D1]; [D2]; [E4]; [E6]; [F2]; [F3]; [H10]

⁴⁶ [A1]; [A4]; [C7]; [E1]; [E6]; [H9]

⁴⁷ [A1]; [B2]; [E5]; [E6]; [H5]

3. Technologieentwicklung

3.1 Windenergie

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In den letzten vier Jahren lagen die weltweiten Investitionen in den erneuerbaren Kraftwerkspark jeweils deutlich oberhalb von 300 Mrd. US-\$⁴⁸. Besonders deutsche Hersteller von Windenergieanlagen (WEA) exportierten einen hohen Anteil ihrer Produkte und könnten diese starke Position auch künftig mit neuen Anlagen und Funktionalitäten erhalten⁴⁹. Nach Ansicht der Akteure ist der Windenergienutzung auch für den heimischen Markt eine große Bedeutung beizumessen, da sie heute etwa 16 % der Bruttostromerzeugung und damit knapp die Hälfte des Stroms aus erneuerbaren Energieanlagen liefert. Dies sei nicht zuletzt auf zuverlässige neue Anlagen mit einer hohen Zahl von Volllaststunden zurückzuführen⁵⁰.

Die großen Erfahrungen aus dem rasanten Zubau an Windleistung sowie intensive Forschung und Entwicklung haben den Akteuren zufolge in den vergangenen Jahrzehnten zu drastisch gesunkenen Stromgestehungskosten geführt⁵¹. Die letzten Ausschreibungen für Windenergieanlagen an Land und auf See haben gezeigt, dass weitere erhebliche Kostensenkungen zu erwarten sind. Voraussichtlich schon in wenigen Jahren könnten Anlagen auch ohne garantierte Einspeisevergütung wirtschaftlich sein⁵². Um dieses Ziel in möglichst kurzer Zeit zu erreichen, seien für einen umweltverträglichen, von der Gesellschaft mehrheitlich unterstützten Ausbau weiterhin intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowohl in der Technologieentwicklung als auch der Begleitforschung zwingend erforderlich⁵³.

Mehrere Akteure empfehlen eine verstärkte internationale Kooperation und/oder interdisziplinäre Forschungsansätze. Dies könne nicht nur für das deutsche Energiesystem einen besonders kosteneffizienten Umbau ermöglichen⁵⁴. Außerdem eröffne eine „Energieforschungsunion“ eine Chance auf ein mögliches neues Kooperationsfeld innerhalb der Europäischen Union⁵⁵. Schnittstellen zu anderen Forschungsthemen bestünden insbesondere in den Bereichen Netze, IKT und Sektorkopplung⁵⁶.

□ Entwicklungsziele

- Reduktion der Lebensdauerkosten von Windenergieanlagen durch Ressourceneffizienz und ganzheitliche Betrachtung vom Anlagendesign über Anlagenertrag und -lebensdauer bis hin zum Rückbau/Recycling der Komponenten (kurz- bis mittelfristig 3 – 5 Jahre)⁵⁷

⁴⁸ [C3]

⁴⁹ [C4]

⁵⁰ [C2]; [C7]

⁵¹ [H7]

⁵² [A2]

⁵³ [A2]; [C2]; [H7]

⁵⁴ [F1]; [F2]; [H7] (AG4)

⁵⁵ [F1]

⁵⁶ [B2]; [F1]; [H7]

⁵⁷ [A2]; [C2]; [E5]; [H7] (AG1/AG3/FA2)

- Erschließung neuer WEA-Standorte unter Berücksichtigung von Fragestellungen der Akzeptanz und Wechselwirkungen mit der Umwelt sowie im Hinblick auf Logistik (on- und offshore), Installationsverfahren, Netzanschluss und Fundamente (kurz- bis mittelfristig 3 – 5 Jahre)⁵⁸
- Effizienter Betrieb von WEA im Windparkverbund im Hinblick auf Betriebsführung, Anlagen- und Parkregelung, Instandhaltungs- und Monitoringkonzepten sowie Anlagenverfügbarkeit (kurz- bis mittelfristig 3 – 5 Jahre)⁵⁹
- Progressive Integration des Windstroms in das Energienetz durch Beiträge zur Netz- und Systemstabilität sowie zur Sektorkopplung (mittel- bis langfristig 5 – 10 Jahre)⁶⁰

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren sprechen sich die Akteure für weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Optimierung der Technologie, im Bereich der Ökologischen Begleitforschung, der Windenergienutzung auf See und auch im Bereich der Grundlagenforschung aus. Dies sei nötig, um die Entwicklungsziele zu erreichen. Ein zentraler Ansatz bestehe in der ganzheitlichen Betrachtung von Windenergieanlagen, der Entwurf, Herstellung, Errichtung, Betrieb, Rückbau, Recycling, aber auch die Rückkopplung mit dem Stromnetz berücksichtige⁶¹. In der folgenden Übersicht sind neu genannte Forschungsthemen für das 7. Energieforschungsprogramm und Förderbereiche, die auf der Basis des laufenden Programms weitergeführt und aktualisiert werden sollten, zusammenfassend dargestellt:

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • „Big Data“, Ausbau der IKT-Infrastruktur • Lebensdauerverlängerung, Recycling • Erschließung neuer Standorte on- und offshore in Hinblick auf größere Anlagen und große Wassertiefen, Verständnis von Welle, komplexem Gelände, Micrositing, Flugsicherung • Zuverlässigkeit, Standardisierung und Komplexitätsreduktion, Modularität • Optimierte Leistungselektronik • Anlagenregelung, Parkregelung, Windparks mit Kraftwerkeigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung einzelner Komponenten und der Gesamtanlage, verbesserte Werkstoffe • Technologische Weiterentwicklungen on- und offshore inklusive Prüfstände, Testfelder • Repowering, Rückbau • Windenergienutzung auf See • Ökologische Begleitforschung, Akzeptanz, Schallminderung • Logistik, Datenauswertung und Verbesserung des Betriebs • Aerodynamik, Ressource Wind • Systemdienlichkeit

Steigende Anforderungen an die leistungselektronischen Bauteile in Windenergieanlagen ergeben sich den Akteuren zufolge nicht nur aufgrund der Lastoptimierung, sondern auch weil die Windener-

⁵⁸ [A1]; [C2]; [H7] (AG1/AG3/AG4/FA1/FA2)

⁵⁹ [A1]; [A2]; [B2]; [E5]; [H7] (AG1/AG2/AG3/FA2)

⁶⁰ [A2]; [A3]; [B2]; [C9]; [H7] (AG1/AG2/AG4/FA1/FA2)

⁶¹ [A2]; [B2]; [C4]; [H7] (AG1/AG2/AG3/AG4)

gie zunehmend zur Sicherung der Systemstabilität beitragen müsse⁶². Zudem bestehe Bedarf für einen ganzheitlichen Ansatz von Entwurf, Herstellung, Errichtung, Betrieb, Rückbau und Recycling von Windenergieanlagen, wobei es insbesondere im Bereich des Recyclings noch nicht für alle Komponenten kostenoptimale Konzepte und Lösungen gebe. Dies betreffe insbesondere die Rotorblätter⁶³.

Die Akteure stufen die Anlagentechnik, vom Rotor über den maschinenbaulichen Teil der Anlage bis hin zur Netzanbindung, als maßgeblich für die Stromgestehungskosten ein⁶⁴. Daher bestünde in diesem Bereich erheblicher Bedarf an Forschung und Entwicklung, der das Ziel habe, zur Effizienzsteigerung und Senkung der Life-Cycle-Costs beizutragen⁶⁵. Dies betreffe sowohl Einzelkomponenten, wie die Zuverlässigkeit mechanischer Bauteile, die Materialentwicklung oder die Entwicklung optimierter Leistungselektronik⁶⁶, als auch die Ebene der Gesamtanlage bzw. des Kraftwerksverbundes im Hinblick auf Anlagen, reduzierte Komplexität und Methoden zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit⁶⁷. Auch das Ziel, die Lebensdauer der Anlagen weiter zu erhöhen, solle künftig beibehalten werden⁶⁸.

Ein weiteres zentrales Thema betreffe den Offshore-Ausbau und im Speziellen die Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen⁶⁹. Dabei stehe eine ganzheitliche Betrachtung beim Design der Gründungen (Herstellung, Logistik, Betrieb, Wartung und Instandhaltung, Lebensdauer, Rückbau) im Fokus⁷⁰. Es bedürfe Neu- und Weiterentwicklungen von Gründungsvarianten und -verfahren sowie verbesserter Konzepte. Diese seien auch anhand von Großversuchen⁷¹, insbesondere mit Blick auf zukünftige Anlagengrößen und große Wassertiefen (bottom-fixed, floating), zu verifizieren. Dabei müssten Umwelteinflüsse (z. B. morphologische Prozesse, mariner Bewuchs, Korrosion, Degradationseffekte auf die Boden-Bauwerksinteraktion) berücksichtigt werden. Hinzu kämen Rückbaukonzepte für Offshore-Windparks unter Berücksichtigung der Schnittstellen zu Demontage und Verwertung⁷².

Dem optimalen, intelligenten und flexiblen Betrieb von Windenergieanlagen und -parks falle eine Schlüsselfunktion zu, um die Kosten zu reduzieren und die Windenergie besser in ein zukunftsfähiges Energiesystem zu integrieren⁷³. Eine effiziente Betriebsführung von WEA durch fortschrittliche Steuerungsstrategien im Verbund von mehreren Windparks benötige verbesserte Prognoseverfahren und Vorhersagemodelle⁷⁴. Um dies zu erreichen, seien Datenmanagement („Big Data“), umfassende Sensorik sowohl der Lasten als auch Echtzeitsimulationen und Modellierung des Windfeldes sowie Großversuche und Testplattformen wichtige Forschungsfelder⁷⁵. Darüber hinaus stelle der Übergang von einer reaktiven Instandhaltungsstrategie zur prädiktiven, zustandsorientierten Instandhaltung durch

⁶² [A2]; [B2]; [H7] (AG 1)

⁶³ [A2]; [A3]

⁶⁴ [H7] (AG1)

⁶⁵ [A1]; [A3]

⁶⁶ [B2]; [H7] (AG1/AG3)

⁶⁷ [A2]; [B2]; [H7] (AG1); [I1]

⁶⁸ [A3]

⁶⁹ [C4]

⁷⁰ [H7] (FA1)

⁷¹ [A2]; [C2]

⁷² [H7] (FA1)

⁷³ [A1]; [H7] (AG2); [I1]

⁷⁴ [C2]; [A1]; [H7] (AG2)

⁷⁵ [A1]; [A2]; [B2]; [H7] (AG1/AG2/AG3)

die Entwicklung intelligenter Monitoringsysteme und die Einbindung von Windparks in hybride Kraftwerksverbände eine zentrale Herausforderung dar⁷⁶.

Um die natürliche Ressource Wind künftig noch besser zur Energieversorgung nutzen zu können, empfehlen die Akteure, physikalische Faktoren als grundlegende Randbedingungen für eine effektive Nutzung mit einzubeziehen und verbesserte praxisnahe physikalische Modelle zu entwickeln⁷⁷. Dazu sei ein besseres Verständnis der Umweltbedingungen (Wind, Turbulenz, Welle, hydrodynamische Lasten, Strömungen, insbesondere im komplexen Gelände, „Micrositing“) sowie des Verhaltens der Anlage selbst (Rotoraerodynamik, Strömungs-Struktur-Kopplung, Gesamtdynamik eines nichtlinearen Systems elastischer Bauteile) durch die Entwicklung geeigneter Mess-, Simulations- und Modellierungsmethoden nebst automatisierter Optimierungsverfahren erforderlich⁷⁸. Bessere Prognosemethoden und Messverfahren für die Schallentwicklung seien auch im Rahmen der Akzeptanzforschung notwendig. Um die verfügbaren Daten optimal nutzen und große Datenmengen hochauflösender Berechnungen und Messungen („Big Data“) analysieren zu können, seien darüber hinaus verbesserte Verfahren zu entwickeln. Weiterhin stellten die Erforschung neuer Materialien für Windenergieanlagen (auch mit Blick auf deren Recyclingfähigkeit) und der auftretenden Schadensmechanismen sowie die Entwicklung von Materialmodellen für einen effizienten und kostengünstigen Bau zentrale Aspekte dar⁷⁹.

Die Akteure schätzen es in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren als wichtig ein, neue Standorte für Windparks mit geringen Störwirkungen, d. h. minimaler Beeinflussung der Umwelt und Landschaft sowie hoher gesellschaftlicher Akzeptanz, zu erschließen. Forschungsbedarf bestehe in folgenden Bereichen: die Auswirkung von Schall auf Menschen und Tiere (Emission und Schallentstehung sowie Entwicklung von Verfahren zur Schallreduktion) zu bewerten sowie Maßnahmen für umweltschonende Transporte und Installationen von WEA und innovativen Recycling-Ansätzen zu erforschen⁸⁰. Darüber hinaus seien die Themen Raumnutzung, Wasserschutz und Flugsicherung relevant⁸¹. Im Bereich der gesellschaftlichen Akzeptanz stehe im Vordergrund, Kommunikationsstrategien zu entwickeln (Beratungsstellen, Partizipationskonzepte) und eine Wahrnehmungsevaluation anzugehen⁸².

Die systemdienliche und zugleich kostenreduzierende Integration von Windenergie in das Energiesystem sei eine weitere wichtige Aufgabe der Windenergieforschung⁸³. Hierbei bestehe einerseits beim Netzanschluss von WEA bzw. Windparks, der zugehörigen Leistungselektronik sowie der Konvertertechnik (insbesondere offshore) großer Forschungsbedarf⁸⁴. Andererseits sei es erforderlich, um Windenergieanlagen mit ihren elektrischen und mechanischen Eigenschaften (virtuelle, rotierende Massen) systemdienlich ins Netz einzubinden, komplexe Regelstrategien zu entwickeln und die WEA

⁷⁶ [A2]; [C2]; [H7] (AG2)

⁷⁷ [A2]; [A3]; [H7] (AG3/ FA2)

⁷⁸ [A2]; [B2]; [C2]; [H7] (AG3)

⁷⁹ [H7] (AG3)

⁸⁰ [A2]; [B2]; [H7] (AG4)

⁸¹ [H7] (AG4)

⁸² [A3]; [H7] (AG4)

⁸³ [H7] (AG4)

⁸⁴ [H7] (AG1/FA1)

mit Speichern zur Stabilisierung des Stromnetzes zu verknüpfen⁸⁵. Dies setze jedoch einen Ausbau der IKT-Infrastruktur und eine sektorübergreifende Standardisierung voraus⁸⁶.

Vor dem Hintergrund der Erschließung neuer WEA-Standorte in komplexem Gelände bzw. an entfernten Offshore-Standorten stellen Transport und Logistik durch die beschränkten Zugangsmöglichkeiten auch künftig große Herausforderungen dar⁸⁷. Die zunehmende Anlagengröße führe zu schwereren und voluminöseren Komponenten, welche ressourceneffizient zu transportieren seien⁸⁸. Forschungs- und Entwicklungsbedarf bestehe bei innovativen (modularen) Anlagendesigns, Logistikkonzepten und Installationsverfahren mit Blick auf Anlagenverfügbarkeit, Transport von Personal und Material, Pooling-Konzepten sowie Betriebs-, Wartungs-, Reparatur- und Sicherheitskonzepten⁸⁹.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Akteure sehen bei der Errichtung neuer Windenergieanlagen in der oft fehlenden Akzeptanz und der verbesserungswürdigen Partizipation der Gesellschaft Entwicklungshemmnisse⁹⁰. Mögliche Konfliktpotenziale ergäben sich dabei insbesondere mit Behörden, Naturschutzverbänden oder Bürgergruppen⁹¹. Ein weiteres Hemmnis liege in der gering ausgeprägten branchenweiten Standardisierung von Komponenten und Methoden⁹². Dies bedinge aufgrund eines ausgeprägten Individualisierungsgrades hohe Entwicklungsaufwände und Bauteilkosten. Weitgehend fehlende Branchenstandards und Regulierungen belasten demnach Hersteller und Lieferanten, da es dadurch verhindert oder erschwert werde, Skaleneffekte entlang der Wertschöpfungskette zu realisieren⁹³.

Im Bereich der Offshore-Windparks bestünden Markthürden insbesondere bei der Netzanbindung, der Instandhaltung sowie der Logistik⁹⁴. Hohe Stromkapazitäten seien über eine große Distanz zu transportieren und die Installation und der Betrieb von Offshore-Windparks erfordere gegenüber anderen Technologien einen speziellen Ansatz für Logistik und Instandhaltung. Dies beginne bei den Installationsverfahren und setze sich bei Betrieb und Wartung fort⁹⁵. Regulatorische Hürden gebe es vor allem beim stetig wachsenden Wettbewerb um die Flächennutzung und damit bei den Planungsverfahren⁹⁶.

⁸⁵ [A2]; [B2]; [C9]; [H7] (AG1/AG2/AG4)

⁸⁶ [B2]; [H7] (AG4)

⁸⁷ [B2]; [H7] (AG2/FA1/FA2)

⁸⁸ [C2]; [H7] (AG1/FA1/FA2)

⁸⁹ [H7] (AG1/FA1/2)

⁹⁰ [F3]

⁹¹ [H7] (AG 4)

⁹² [B2]; [H7] (AG 1)

⁹³ [H7] (AG 1)

⁹⁴ [C2]; [H7] (FA 1)

⁹⁵ [H7] (FA 1)

⁹⁶ [A2]; [H7] (AG 4)

3.2 Photovoltaik

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung (national und international)

In einigen Expertenempfehlungen und Positionspapieren heben die Akteure die bisherige Entwicklung des Photovoltaikweltmarkts hervor. Seit etwa dem Jahr 2000 weise dieser durchschnittliche Wachstumsraten von über 30 % pro Jahr auf und allein für 2017 werde die Rate auf 95 GW geschätzt. Deutschland hat mit seiner Vorreiterrolle hinsichtlich Forschung, großtechnischer Umsetzung und Markteinführung einen großen Anteil an dieser Entwicklung geleistet. Die stetige Weiterentwicklung der Produktionstechnik habe wesentlich dazu beigetragen, die Kosten für Solarstrom in Deutschland von 50 Euro-Cent/kWh im Jahre 2000 auf heute unter 6 Euro-Cent/kWh zu senken⁹⁷. Es sei absehbar, dass die Photovoltaik (PV) eine wesentliche und CO₂-freie Säule für eine weltweit erfolgreiche Energiewende sein werde⁹⁸, wobei zu berücksichtigen sei, dass bei einer Stromversorgung mit hohem PV-Anteil eine verlässliche Energiebereitstellung erfolgen müsse. Damit falle der Systemtechnik beim Aufbau einer Stromversorgung mit hohem PV-Anteil eine wichtige Rolle zu⁹⁹.

Um die Vorteile auch in Zukunft zu sichern, die Solartechnik aus Deutschland mit einer hohen Qualität der Produkte sowie technisch fortschrittlicher und innovativer Produktionsverfahren biete, seien kontinuierliche Forschungsaktivitäten erforderlich. Auf dieser Grundlage seien auch bei deutschen PV-Herstellern in jüngster Zeit erste Anzeichen für eine Trendwende zu erkennen¹⁰⁰.

Viele PV-Schlüsseltechnologien seien in den letzten 30 Jahren bei Forschungseinrichtungen und Unternehmen in Deutschland erforscht und in die industrielle Massenproduktion überführt worden. Einen zentralen Beitrag dazu habe der Maschinenbau beigetragen, der mit einem Weltmarktanteil von über 50 % eine global führende Rolle spiele. Deutsche Photovoltaik-Maschinenbauer bieten demnach einem internationalen Kundenkreis leistungs- und wettbewerbsfähige Anlagen mit hoch-effizienten Prozessen für die Massenproduktion. Es bestehe jedoch die Notwendigkeit, sich ständig mit Innovationen von der internationalen Konkurrenz, die insbesondere in Fernost an Stärke gewinne, abzuheben. Nur mit effizienzsteigernden technologischen Weiterentwicklungen ist es möglich, die spezifischen Kosten weiter zu senken. Dabei müsste es eine weitergehende Prozesskontrolle ermöglichen, Logistik und Automatisierungskonzepte, Fabrik-Layout bis hin zu Servicequalität unter Berücksichtigung von Modellen aus Industrie 4.0 und IoT (Internet of Things) zu verbessern¹⁰¹.

Im Bereich der photovoltaischen Stromerzeugung steige zunehmend die energiepolitische Bedeutung der Gebäude-Integration von PV-Modulen (BIPV – Building Integrated PV) und der PV-Ertragsprognostik. Diese trägt dazu bei, die Investitionsrisiken zu senken und die Stromversorgung zu sichern¹⁰². Ein konsequentes Recycling vervollständige einen nachhaltigen Umgang mit den in PV-Systemen verwendeten Rohstoffen über ihre Entsorgung hinaus und sei für eine umweltverträgliche Energieversorgung unerlässlich¹⁰³.

⁹⁷ [A3]

⁹⁸ [E1]

⁹⁹ [H5] (AG4)

¹⁰⁰ [H6]

¹⁰¹ [H6]

¹⁰² [A3]; [E1]; [H5] (AG3/AG5)

¹⁰³ [A3]; [H5] (AG5)

□ Entwicklungsziele

- Im Hinblick auf eine konkurrenzfähige Photovoltaikindustrie und eine erfolgreiche weltweite Energiewende sei es wichtig, bei steigender Produktqualität mögliche Kostensenkungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu realisieren. Dabei sei eine kontinuierliche Steigerung des Wirkungsgrades, der Produktivität, ein verminderter Ressourcenverbrauch sowie eine höhere Lebensdauer anzustreben (kurz- bis langfristig, 3 – 10 Jahre)¹⁰⁴.
- Vor dem Hintergrund des erreichten Entwicklungsstands der Photovoltaik bestehe eine Hauptaufgabe darin, neue Technologien bis zur Produktionsreife weiterzuentwickeln sowie deren Kosteneffizienz nachzuweisen. Damit einhergehend sei es erforderlich, Produktionen mit industriellem Durchsatz aufzubauen, um Skaleneffekte nutzen zu können (kurz- bis mittelfristig, 3 – 5 Jahre)¹⁰⁵.
- Ferner erforderten diverse Anwendungen maßgeschneiderte Produktlösungen, wie z. B. die gebäudeintegrierte PV. Diese Märkte werden langfristig einen größeren Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten, stellten aber Anforderungen an die Technologie, die über die reine Fokussierung auf eine maximale Stromerzeugung hinausgingen (kurz- bis langfristig, 3 – 10 Jahre)¹⁰⁶.
- Weiter stehe die Integration der PV in die Energiesysteme im Fokus, wobei die Qualität der Versorgung garantiert sein muss (mittelfristig, ca. 5 Jahre)¹⁰⁷.
- Das konsequente Recycling aller in PV-Systemen verwendeten Stoffe stelle eine weitere Bedingung für eine grundlegend umweltkompatible Energieversorgung dar (kurz- bis langfristig, 3 – 10 Jahre)¹⁰⁸.

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Den künftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf sehen die Akteure der Expertenempfehlungen und Positionspapiere vorrangig in der industrienahen Forschung mit schneller Umsetzung in die Fertigung. Dazu seien als Organisationsform bevorzugt Verbundprojekte zwischen Unternehmen (PV-Industrie, Material- und Anlagenhersteller, Anbieter von Photovoltaik-Systemtechnik) sowie Forschungseinrichtungen und Universitäten geeignet.

Im Verlauf des Konsultationsprozesses haben die Akteure eine Vielzahl an neuen technologischen Herausforderungen identifiziert, die für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der PV untersucht und gelöst werden müssten. Teilweise bauen sie auf den Ergebnissen des laufenden Energieforschungsprogramms auf. So zeigt die folgende Tabelle in der linken Spalte neue Forschungsschwerpunkte, die in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren für das 7. Energieforschungsprogramm vorgeschlagen werden. In der rechten Spalte finden sich die Forschungsansätze, die bereits im laufenden Programm gefördert und im Rahmen dieses Konsultationsprozesses weiterhin als wichtig eingestuft wurden.

¹⁰⁴ [A3]; [E1]; [H5]; [H6]

¹⁰⁵ [H5]; [H6]

¹⁰⁶ [A3]; [E1]; [H5] (AG3); [H6]

¹⁰⁷ [A3]; [E1]; [H5] (AG4); [H6]

¹⁰⁸ [A3]; [H5] (AG5)

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung der Produktivität bestehender und zukünftiger Produktionslinien durch die breite Einführung von „Industrie 4.0“-Konzepten • Integration neuer, selektiver oder heterojunction Kontakte in industrietypische Siliziumsolarzellen (Steigerung der Wirkungsgrade auf 23 – 25 % in der Produktion) • Entwicklung von hocheffizienten Tandemsolarzellen und -modulen auf Basis des kristallinen Siliziums oder Dünnschichtsolarzellen • Einsatz neuer funktionaler Komponenten bei Dünnschicht-Modulen (insbesondere CuIn(Ga)Se – CIGS) • Entwicklungen für die Gebäudeintegration von Photovoltaik (BIPV) unter Einschluss innovativer Prozesstechnik • Erweiterung der Systemtechnik durch Etablierung einer neuen Generation von PV-Großkraftwerken mit netzdienlichen Kraftwerkseigenschaften für das Verbundnetz 	<ul style="list-style-type: none"> • Beim kristallinen Silizium Optimierung aller Fertigungsschritte, insbesondere durch „kerfless Wafering“, Umsetzung beidseitig lichtempfindlicher, bifazialer Solarzellen und neuer Modulverschaltungstechnologien (Multi-Busbar/Wireansätze) • Steigerung der Modulwirkungsgrade um 20 % relativ bei Verdopplung von Produktivität und Durchsatz bei Dünnschicht- und Mehrfach-Konzentrator-Modulen • Technologien für dezentrale netzgekoppelte PV-Erzeugung und Verbrauch • Verbesserte Generation von PV-Diesel-Systemlösungen für die umweltfreundliche Stromversorgung in Inselnetzen • Verbesserung von Lebensdauer, Ertragsprognosen und Qualitätssicherungsmaßnahmen auf Systemebene für eine verlässliche Energiebereitstellung • In PV-Systemen umweltbelastende oder seltene Elemente vermeiden und alle verwendeten Stoffe im Pilotmaßstab recyceln

Die Akteure sehen durch die breite Einführung von „Industrie 4.0“-Konzepten in Fertigungsanlagen und Produktionslinien vielversprechende, neue und konkrete Forschungsansätze in der Entwicklung innovativer Prozesstechnologien für kostengünstigere, leistungsfähigere, effizientere Solarzellen und Module. Das Ziel ist dabei die Produktivitätssteigerung und Qualitätssicherung¹⁰⁹. So lasse insbesondere die Integration neuer, selektiver oder heterojunction Kontakte in industrietypischen Siliziumsolarzellen es realistisch erscheinen, in den nächsten fünf Jahren die Wirkungsgrade von heute 20 bis 22 % auf 23 bis 25 % weiter zu steigern¹¹⁰. Darüber hinaus empfehlen die Akteure, Konzepte für hocheffiziente Tandemsolarzellen und Tandemsolarmodule auf Basis des kristallinen Siliziums oder Dünnschichtsolarzellen¹¹¹ zu entwickeln. Diese zielten langfristig auf weitere Wirkungsgradsteigerungen und Kostensenkungen. Bei Dünnschicht-Modulen (insbesondere CuIn(Ga)Se - CIGS) seien der Einsatz neuer funktionaler Komponenten, wie z. B. Passivierungsschichten oder Punktkontakte, sowie neuer Materialien und Verfahren, z. B. die Rolle-zu-Rolle Beschichtung, zu entwickeln¹¹².

Verstärkte Aktivitäten seien ferner auf die Entwicklung der gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV) unter Einschluss innovativer Prozesstechnik zu legen. Dies schließt eine architektonisch attraktive Gestaltung einschließlich der Systemtechnik ein. Die BIPV zeige den Weg zu energieeffizienten Gebäuden auf und verweise auf verwandte, maßgeschneiderte Produktlösungen für transportmittelin-

¹⁰⁹ [E1]; [H5] (AG3/AG5); [H6]

¹¹⁰ [E1]; [H5] (AG1)

¹¹¹ [A3]; [E1]; [H5] (AG2)

¹¹² [A3]; [E1]; [H5] (AG3)

tegrierte PV (VIPV) und andere Anwendungsfelder. Hier böten insbesondere die PV-Dünnschichttechnologien (CIGS, OPV, Perowskite) mit ihren anpassbaren, vielfältigen Materialeigenschaften, wie Flexibilität, Transparenz, Farb- und Formgebung, bislang ungenutzte Potenziale¹¹³.

Weiterer vordringlicher Forschungsbedarf bestehe darin, die Systemtechnik so zu erweitern, dass sich eine neue Generation von PV-Großkraftwerken mit netzdienlichen Kraftwerkseigenschaften im Verbundnetz etablieren kann¹¹⁴.

Die Akteure sehen für eine erfolgreiche Entwicklung der Photovoltaik auf Basis kristallinen Siliziums in folgenden Bereichen weiterhin Forschungsbedarf: die Kristallqualität in der Waferherstellung unter Einschluss der Optimierung der Material- und Energiekosten durch neue Fertigungskonzepte zu erhöhen. Ein Beispiel ist das „kerfless Wafering“ besonders bei der Herstellung von dünnen Siliziumwafern aus der Gasphase¹¹⁵. Weiterhin gehe es darum, beidseitig lichtempfindliche Siliziumsolarzellen mit einer Bifazialität von bis zu 90 % umzusetzen sowie neue Modulverschaltungstechnologien (z. B. Multi-Busbar/Wire- oder Schindelansätze) zur Erhöhung der Lichtausbeute im Modul und unter Verringerung des Zell-zu-Modul-Verlustes zu entwickeln¹¹⁶. Bei Dünnschicht-Modulen (insbesondere CuIn(Ga)Se – CIGS), Mehrfach-Konzentrator-Solarzellen und Modulen sowie organischen Solarzellen und Modulen (OPV) und neuartigen Solarzellen erwarten sie innerhalb der nächsten 5 Jahre einen um 20 % relativ gesteigerten Modulwirkungsgrad sowie eine Verdopplung von Produktivität und Durchsatz¹¹⁷.

Technologieübergreifend seien in folgenden Bereichen weitere Förderaktivitäten notwendig: Erstens gelte dies für alle Entwicklungen hin zu einer gesteigerten Produktivität bestehender und zukünftiger Produktionslinien durch einen höheren Anlagendurchsatz sowie verbesserte Prozess- und Materialausbeuten, Verfügbarkeit und Skalierung, Entwicklung und Integration von Lasertechnik und alternativer neuer Abscheidemethoden¹¹⁸. Zweitens gehe es um eine erhöhte Lebensdauer der Produkte auf Basis von Analysen der Degradationsmechanismen und eine damit verbundene Entwicklung angepasster Mess- und Simulationstechniken¹¹⁹. Der dritte Aspekt betreffe die Vermeidung umweltbelastender oder seltener Stoffe¹²⁰.

Bei der Systemtechnik empfehlen die Akteure, die Arbeiten zu neuen dezentralen PV-Anlagen fortzuführen. Diese bieten die Möglichkeit, Strom verbrauchsnahe zu erzeugen und zur kostengünstigen Deckung des lokalen Bedarfs einzusetzen¹²¹. Weitere Aktivitäten sollen auf verbesserte Messtechniken/Datenanalysen, bessere Ertragsprognosen, neuartige Steuerungs- und Regelungssysteme, Auslieferungsverfahren und „Operation and Maintenance“ (O&M)-Strategien zielen. Dies schließe den Nachweis ihrer Wirtschaftlichkeit¹²², zur Systemeinkbindung in den Energiehandel, wie beispielsweise für Mieterstrom und Quartiersmanagement, und der Erhöhung von solaren Deckungsanteilen ein. Weiterhin gehe es dabei auch um Batterieintegration sowie um Netzzrückwirkungen und ihre Beein-

¹¹³ [A3]; [E1]; [H5] (AG3)

¹¹⁴ [H5] (AG4)

¹¹⁵ [E1]; [H5] (AG1/AG2)

¹¹⁶ [H5] (AG1); [E1]

¹¹⁷ [E1]; [H5] (AG3)

¹¹⁸ [E1]; [H5] (AG1/AG2/AG3); [H6]

¹¹⁹ [E1]; [H5] (AG5)

¹²⁰ [H5] (AG2)

¹²¹ [H5] (AG4)

¹²² [H5] (AG4/AG5)

flussung¹²³. Der letzte Aspekt betreffe die Entwicklung einer verbesserten Generation von PV-Diesel-Systemlösungen für die umweltfreundliche Stromversorgung in Inselnetzen¹²⁴.

Zukünftig sollen auch die bisherigen Forschungsziele weiterverfolgt werden, die Lebensdauer, Ertragsprognosen und Qualitätssicherungsmaßnahmen auf Systemebene für eine verlässliche Energiebereitstellung zu verbessern¹²⁵ und alle im PV-System verwendeten Stoffe im Pilotmaßstab zu recyceln¹²⁶.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Wirtschaftlichkeit von PV-Anwendungen sei für die Akzeptanz und die großflächige Anwendung der betrachteten Technologien ausschlaggebend. In diesem Zusammenhang seien für die Weiterentwicklung von Prozessequipment, vorgeschaltet vor eine industrielle Produktion, Pilotversuche in Demonstrationsanlagen von großer Bedeutung. Dies erfordere geeignete industrielle Entwicklungsplattformen¹²⁷. Bei der gebäudeintegrierten Photovoltaik sind bei neuartigen Anwendungen architektonische und baurechtliche Anforderungen zu beachten. Die zunehmend größere Netzdurchdringung erfordere eine noch engere Abstimmung mit den Netzbetreibern¹²⁸.

Bei der Entwicklung ist zu beachten, die bisher teilweise verwendeten gesundheitsgefährdenden Materialien, wie Blei und Cadmium, oder knappen Ressourcen, wie Indium, zu reduzieren bzw. möglichst komplett zu vermeiden¹²⁹. Bei neuen PV-Materialien (OPV, Perowskite, etc.) unterscheidet sich sowohl die Herstellung als auch die Verarbeitung von den etablierten Technologien. Dabei wirken sich Defizite auf die Lebensdauer (Perowskite) oder die Effizienz (OPV) auf die jeweiligen Anwendungsfelder aus. Folglich müsse jeweils der Nutzen für spezifische Anwendungen und der Vorteil dieser Technologien klar erkennbar sein¹³⁰.

¹²³ [H5] (AG5)

¹²⁴ [H5] (AG4)

¹²⁵ [E1]; [H5] (AG5)

¹²⁶ [A3]; [H5] (AG5)

¹²⁷ [H5] (AG2); [H6]

¹²⁸ [A3]; [E1]; [H5] (AG4)

¹²⁹ [H5] (AG2)

¹³⁰ [A3]; [H5] (AG3)

3.3 Geothermie

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Die Akteure stellen in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren folgende Stärken der Geothermie in den Vordergrund: die kontinuierliche Verfügbarkeit, die Unerschöpflichkeit, die positive Ökobilanz, die Einsparung von CO₂ im Wärmebereich, die geopolitische Unabhängigkeit und die binnenwirtschaftliche Wertschöpfung. Unter die Bezeichnung „Oberflächennahe Geothermie“ fallen alle Bohrungen in den obersten 400 m der Erde, während „Tiefe Geothermie“ die Bohrungen meint, die tiefer als 400 m gehen. Wie die Wärmegewinnung sei darüber hinaus auch die saisonale Wärmespeicherung sowohl im oberflächennahen als auch im tieferen Untergrund möglich¹³¹.

Tiefengeothermische Anlagen können der Bereitstellung von Wärme und – bei entsprechenden Voraussetzungen – der Erzeugung von Strom dienen. Neben der direkten lokalen Nutzung des Thermalwassers zu balneologischen Zwecken und zur Gebäudeheizung, welche derzeit in Deutschland an mehr als 160 Standorten erfolgt, stellt die Belieferung von Fernwärmenetzen die vorrangige Nutzung tiefer geothermischer Reservoirs dar. Bisher existieren 23 derartige Anlagen in Deutschland. Zukünftig stehe die Wärmeversorgung in Ballungsgebieten und auch Quartieren im Mittelpunkt, um zur Wärmewende beizutragen¹³². Im Gegensatz dazu wird oberflächennahe Erdwärme bereits heute in mehr als 350.000 Anlagen (Stand: 2018) genutzt. Das große technische und geologische Potenzial dieses Verfahrens sei in Deutschland bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Den vergleichsweise hohen Investitionskosten oberflächennaher geothermischer Anlagen gegenüber konkurrierenden Energiequellen stünden deutlich geringere Betriebskosten gegenüber. Zurzeit liege der Haupteinsatzbereich erdgekoppelter Wärmepumpen in der Versorgung neu errichteter niedergeschossiger Wohneinheiten sowie der Kühlung von Büro- und Gewerbegebäuden, wie z. B. Einkaufszentren. Erweiterungspotenziale liegen demnach bei der Wärmeversorgung von mehrgeschossigen Gebäuden, insbesondere im Bestand, bei geothermischen Komponenten für Nahwärmenetze sowie in neuen Einsatzbereichen, wie z. B. die Weichenheizung¹³³.

Darüber hinaus falle bei der Umsetzung der Energiewende der Energiespeicherung eine zentrale Rolle zu. Dabei gehörten geothermische Wärme- und Kältespeicher zu den kostengünstigsten Energiespeichern. Sie könnten folglich eine erhebliche Rolle bei der Sektorenkopplung spielen. Auch der Nutzung des Untergrundes für die Klimatisierung werde zukünftig bedeutsamer¹³⁴.

□ Entwicklungsziele

- Erschließung der Geothermie zu einer nachhaltigen Energieversorgung im Wärmebereich (Geothermie als Beitrag zur „Wärmewende“)
- Einsatz der Geothermie zur saisonalen Speicherung von Wärme und Kälte im oberflächennahen und tiefen Untergrund
- Demonstrationsprojekte mit unterschiedlichen hydrogeologischen Bedingungen
- Stoffliche Nutzung der gefördert geothermischen Fluide

¹³¹ [C6]

¹³² [C6]; [E6]

¹³³ [C6]

¹³⁴ [C6]

- Entwicklungen zur besseren Anpassung der Wärmeverteilnetze an Abnehmer und Quellen
- Demonstrationsprojekte für die hydraulische Stimulation im Kristallin und dichten Sedimentgestein

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die folgende Tabelle stellt Themenschwerpunkte zusammenfassend dar, die aus Sicht der Akteure ins neue, 7. Energieforschungsprogramm aufgenommen sowie Förderbereiche, die auf der Basis des laufenden Programms weitergeführt und aktualisiert werden sollten.

Den Positionspapieren zufolge kann Forschung zur weiteren Erschließung der Geothermie und damit zu einer nachhaltigen Energieversorgung beitragen, insbesondere zur Bereitstellung von Wärme¹³⁵. Forschung und Entwicklung sollten dementsprechend verstärkt werden, wobei zukünftig die Wärmeversorgung in Ballungsgebieten (Quartieren) mehr im Fokus stehen werde¹³⁶.

Der bisherige Forschungsbereich tiefe Geothermie wurde um die oberflächennahe Geothermie sowie um die Speicherung von Wärme und Kälte im Untergrund erweitert. Diese Nutzungsarten haben im laufenden Energieforschungsprogramm noch keinen eigenen Förderschwerpunkt, sondern waren bislang in den Themen „Energieoptimierte Gebäude und Quartiere“ sowie „Thermische Speicher“ im systemischen Kontext eingeordnet. Diese Ergänzung trägt der zunehmenden Annäherung der drei Nutzungsarten Rechnung, gleichwohl die klassische Unterscheidung von oberflächennaher und tiefer Geothermie beibehalten werde¹³⁷. Alle drei Nutzungsarten sind jetzt unter der Überschrift „Geothermie“ zusammengefasst.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm (alle ¹³⁸)	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau verlässlicher, effizienter und wirtschaftlicher geothermischer Anlagen, insbesondere in Ballungsgebieten (kurz- bis langfristig, 3 – 10 Jahre) • Weiterentwicklungen und Anpassungen in der Bohr- und Messtechnik sowie der Bohrablaufplanung zur Zeit- und Kosteneinsparung (kurz- bis langfristig, 3 – 10 Jahre) • Verbesserte hydraulische Reservoir-Stimulation, insbesondere zur Erschließung von dichten Tiefengesteinen („Hot-Dry-Rock“- bzw. „Engineered -“ oder „Enhanced Geothermal Systems“) unter Eingrenzung von spürbarer Seismizität (mittel- bis langfristig, 5 – 10 Jahre) • Verbesserte Planbarkeit und Betriebsoptimierung geothermischer Anlagen (kurz- bis 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau verlässlicher, effizienter und wirtschaftlicher geothermischer Anlagen, insbesondere in Ballungsgebieten • Weiterentwicklung und Anpassung in der Bohr- und Messtechnik sowie der Bohrablaufplanung zur Zeit- und Kosteneinsparung • Anpassung der Tiefpumpentechnologie an die speziellen Anforderungen der Geothermie • Verbesserte hydraulische Reservoir-Stimulation (EGS) unter Eingrenzung von spürbarer Seismizität • Tieferes Verständnis zur seismischen Aktivität im Zusammenhang mit geothermischen Anlagen • Optimierung des Betriebs von Erdwärmeson-

¹³⁵ [C6]; [F1]

¹³⁶ [A1]; [C6]

¹³⁷ [C6]

¹³⁸ [C6]

<p>langfristig, 3 – 10 Jahre)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der Tiefpumpentechnologie an die speziellen Anforderungen in tiefengeothermischen Anwendungen (kurz- bis mittelfristig, 3 – 5 Jahre) • Verbesserte Effizienz bei tiefengeothermischen Kraftwerken (mittelfristig, 5 Jahre) • Verbesserte Einbindung geothermischer Wärmebereitstellung in das Energieversorgungssystem (kurz- bis langfristig, 3 - 10 Jahre) • Nutzung des Mineralbestandes der geförderten Thermalsole tiefer Grundwasserleiter (mittel- bis langfristig, 5 - 10 Jahre) • Verbesserter Grundwasserschutz (kurz- bis mittelfristig, 3 – 5 Jahre) • Weiterentwicklung und Konzepte zur Einbindung geothermischer Speicher im oberflächennahen sowie tiefen Untergrund (mittel- bis langfristig, 5 – 10 Jahre) 	<p>denfeldern</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Komplettierung von Erdsondenbohrungen zur optimierten thermischen Anbindung und zum Grundwasserschutz • Einbindung der Geothermie in Niedertemperaturnetze • Erweiterung der Einsatzfelder und Entwicklung alternativer Sondenkonzepte • Soziale Akzeptanz der Geothermie • Erweiterung der Sammlung und Aufbereitung geologischer und geothermischer Daten auch außerhalb bisheriger Hauptnutzungsgebiete • Weiterentwicklung des Korrosions- und Scalingschutzes zur Erhöhung der Standzeiten geothermischer Anlagen • Verbesserung der numerischen Modellierung und Simulation geothermischer Systeme
---	---

Die Akteure benannten folgende neue Forschungsansätze für die tiefe Geothermie:

- Demonstrationsprojekte mit unterschiedlichen hydrogeologischen Bedingungen und zur Förderung industrieller und universitärer Begleitforschung zu den Themen Grundlastfähigkeit, Risiko- und Kostenoptimierung, Fündigkeit oder Exploration¹³⁹
- Demonstrationsprojekte für die hydraulische Stimulation im Kristallin und dichten Sedimentgestein¹⁴⁰
- Entwicklungen zur Anpassung der Wärmeverteilnetze an Abnehmer und Quellen¹⁴¹

Darüber hinaus sollten aus Sicht der Forschung folgende Themen für eine erfolgreiche Entwicklung der tiefen Geothermie teilweise neu akzentuiert oder ergänzt fortgesetzt werden (alle ¹⁴²):

- Sammlung und Aufbereitung geologischer und geothermischer Daten durch die Kombination geophysikalischer Methoden – dabei sind regionale geologische Aspekte wie z. B. Molassebecken, Oberrheingraben oder norddeutsches Becken zu berücksichtigen – und bessere Reflexionsseismik zur Erfassung kleinräumiger Strukturen in den Reservoirhorizonten
- Weiterentwicklung der Bohrtechnologie mit dem Ziel der Kostenreduzierung sowie der Erhöhung der Bohrgeschwindigkeit bei geringerem Bohrrisiko
- Weitere Anpassung von Tools der Kohlenwasserstoffindustrie für die Geothermie, insbesondere die Verbesserung von Verlässlichkeit und Effizienz von Tiefpumpen

¹³⁹ [C6]; [A1]

¹⁴⁰ [C6]

¹⁴¹ [C6]

¹⁴² [C6]

- Weiterentwicklung im Bereich der Turbinen- und Anlagenwirkungsgrade bei ORC- und Kalina-Anlagen sowie die Entwicklung und Erprobung geeigneter Werkstoffe
- Weiterentwicklung geeigneter Konzepte zum Monitoring und zur Vorhersage von seismischen Aktivitäten, insbesondere in urbanen Gebieten, sowie Charakterisierung und Zonierung des oberflächennahen Raumes zur seismischen Gefährdungsabschätzung (Mikrozonierung)
- Entwicklung von Inhibitoren und anderen Formen des Korrosions- und Scalingschutzes
- Forschung zur stofflichen Nutzung der geförderten geothermischen Fluide
- Verbesserung der numerischen Modellierung und Simulation geothermischer Systeme durch die Kopplung von hydro- und geochemischen Reservoirmodellen (THMC-Modellierung) und zur Prognose der Durchlässigkeit einschließlich der Veränderung bei Reinjektion
- Studien oder Begleitstudien zur gesellschaftlichen Akzeptanz¹⁴³

Auf dem Gebiet der oberflächennahen Geothermie erkennen die Akteure folgenden Forschungsbedarf:

- Optimierung des Betriebs von Erdwärmesondenfeldern¹⁴⁴
- Verbesserung der Bohrverfahren und der Hinterfüllung zur optimierten thermischen Anbindung und zum Grundwasserschutz¹⁴⁵
- Verbesserung der Wärmepumpensysteme, u. a. im Hinblick auf den Einsatz im Gebäudebestand, sowie deren Einbindung in intelligente Netze (smart grids)¹⁴⁶
- Einbindung der Geothermie in Niedertemperaturnetze und deren Potenzial zur Wärme- und Kältespeicherung¹⁴⁷.
- Erweiterung der Einsatzfelder und Entwicklung alternativer Sondenkonzepte¹⁴⁸
- Untersuchung der langfristigen Auswirkungen auf das oberflächennahe Grundwasser¹⁴⁹

Forschungsbedarf bei geothermischen Wärme- und Kältespeichern besteht den Positionspapieren zufolge in folgenden Bereichen:

- Speicher im oberflächennahen Untergrund in urbanen Gebieten und ihre intelligente Verknüpfung mit Nutzern, Untersuchung möglicher temperaturabhängiger mikrobieller und chemischer Veränderungen sowie Konzepte zum Monitoring von Wärme- und Fluidveränderungen¹⁵⁰.
- Speicher im tieferen Untergrund unter Weiterentwicklung der System- und Betriebsoptimierung, der Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen sowie die Installation von Demonstrationsanlagen¹⁵¹

¹⁴³ [A1]; [B2]

¹⁴⁴ [C6]; [E6]

¹⁴⁵ [C6]; [E6]

¹⁴⁶ [C6]; [E6]

¹⁴⁷ [C6]; [E6]

¹⁴⁸ [C6]

¹⁴⁹ [C6]

¹⁵⁰ [C5]; [C6]; [E6]

¹⁵¹ [C6]; [E6]

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Nach Ansicht der Akteure bestehen hohe technische Hürden in den geologischen Bedingungen und in der Datenlage zum Untergrund. Diese bestimmen das Fündigkeitsrisiko bei der Errichtung tiefe-
o-thermischer Anlagen inklusive saisonaler Speicher und damit das wirtschaftliche Risiko¹⁵². Als
Hemmnis für den Ausbau geothermischer Stromerzeugung sowie petrothermaler Systeme mit der
EGS-Technologie, die bislang über den Pilotmaßstab nicht hinausgekommen sind, hätten sich die
moderaten Temperaturen im geologischen Untergrund und die damit verbundenen Investitionskosten
bei gleichzeitig hohem Erfolgsrisiko erwiesen¹⁵³.

Hohe Investitionskosten mit langer Amortisationsdauer – im Vergleich zu anderen Heizsystemen –
schreckten viele Interessenten von der Nutzung der oberflächennahen Erdwärme ab. Dies gelte ins-
besondere bei Bestandsbauten, weil z. B. wegen der verringerten Vorlauftemperatur bei der geplan-
ten Ablösung einer Öl- oder Gasheizung durch eine erdgekoppelte Wärmepumpenanlage weitere
Anpassungen am Heizsystem erforderlich seien¹⁵⁴. Darüber benötigten alle drei Formen der Ge-
o-thermie für eine erfolgreiche Umsetzung die Akzeptanz der lokalen Bevölkerung¹⁵⁵.

¹⁵² [A1]

¹⁵³ [C6]

¹⁵⁴ [C6]

¹⁵⁵ [C6]

3.4 Wasserkraft und Meeresenergie

Zum Thema Wasserkraft und Meeresenergie liegen keine umfassenden Expertenempfehlungen und Positionspapiere vor. Lediglich in einem Positionspapier aus den Bundesländern wird die Stärkung „randständiger“ Themen – darunter Wasserkraft – gefordert¹⁵⁶.

¹⁵⁶ [A1]

3.5 Solarthermische Kraftwerke

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren betonen die Akteure, dass Klimaschutz und der zugehörige Umbau der Energieversorgung eine globale Herausforderung darstellen, die auf die jeweiligen Regionen und Märkte der Erde auszurichten seien. Dabei spiele die verstärkte Nutzung der Sonneneinstrahlung eine wesentliche Rolle. Deutschlands Anteil beschränke sich dabei nicht ausschließlich auf die nationale Umsetzung der Klimawende, da deutsche Unternehmen und Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der solarthermischen Stromerzeugung weltweit in vielen Bereichen führend seien. Damit verfüge Deutschland über ein hohes Exportpotenzial, erziele hohe Lieferanteile in entsprechenden Kraftwerksprojekten und leiste nicht zuletzt wesentliche Beiträge bei der weltweiten Bereitstellung umweltschonender Technologien¹⁵⁷.

Solarthermische Kraftwerke in Verbindung mit zukunftssträchtiger thermischer Speichertechnik oder Zusatzfeuerung eigneten sich – unabhängig von volatiler Stromerzeugung – für eine bedarfsgerechte und sichere Grundlasteinspeisung von Strom¹⁵⁸. Darüber hinaus seien solarthermische Kraftwerke für Power-to-Liquids (PtL)-Prozesse einsetzbar¹⁵⁹.

Die Stromgestehungskosten solarthermischer Kraftwerke sind je nach Sonneneinstrahlungs- und Finanzierungsbedingungen in den vergangenen Jahren von rund 30 Euro-Cent je Kilowattstunde auf heute ca. 6 Euro-Cent gesunken. Damit verfügten solche Anlagen, z. B. in Kombination mit PV-Kraftwerken, eine mit Erdgaskraftwerken vergleichbare Wettbewerbsfähigkeit¹⁶⁰.

□ Entwicklungsziele¹⁶¹

- Integrationskonzepte für solarthermische Kraftwerke und Wärmespeicher im Verbund mit anderen erneuerbaren Energien mit dem Ziel einer bedarfsgerechten Bereitstellung von Strom und Wärme
- Reduzierung der Stromgestehungskosten durch innovative Komponenten und Systeme einschließlich deren Betriebsweisen bei erhöhter Betriebsflexibilität und Lebensdauer
- Nutzung innovativer digitaler Technologien zur weiteren Senkung der Kosten von solarthermischen Kraftwerken bei gleichzeitiger Steigerung von Effizienz und Zuverlässigkeit sowie Verkürzung der Entwicklungszyklen von Komponenten und Systemen, neue prädiagnostische Wartungskonzepte und Minimierung der Planungs- und Bauzeiten
- Standardisierung von Mess- und Prüfverfahren zur Erfassung der Qualität von Komponenten und Subsystemen für solarthermische Kraftwerke

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Nach Ansicht der Akteure bestehe bei den solarthermischen Kraftwerken ein vielfältiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dieser reiche von der Integration der Kraftwerke in einen Verbund mit an-

¹⁵⁷ [H8] (AG3)

¹⁵⁸ [C5]; [H8] (AG3)

¹⁵⁹ [C3]

¹⁶⁰ [H8] (AG3)

¹⁶¹ Alle Entwicklungsziele: [H8] (AG3)

deren Anlagen über Verfahren zur Wärmespeicherung, der Standardisierung von Mess- und Prüfverfahren bis hin zur Bereitstellung synthetischer Treibstoffe und von Prozesswärme. Die folgende Tabelle stellt neue Themen, die im Konsultationsprozess genannt wurden, und Schwerpunkte des laufenden Energieforschungsprogramms, die aus Sicht der Akteure fortgeführt werden sollen, gegenüber:

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeptstudien, Demonstrations- und Pilotanlagen für Integrationskonzepte und Wärmespeicher im Verbund mit anderen Strom- und Wärmeerzeugern • Angewandte Forschung und Demonstrationsvorhaben sowie Studien zu Systemanalyse und -optimierung mit dem Ziel einer techno-ökonomischen Effizienzsteigerung • Angewandte Forschung, Verifizierung in Testanlagen und kommerziellen Systemen, Vorserienentwicklung und Demonstrationsvorhaben zur Nutzung innovativer digitaler Technologien • Angewandte und pränormative Forschung in internationale Initiativen zur Vorbereitung von Standards für solarthermische Kraftwerke 	<ul style="list-style-type: none"> • Standardisierung von Mess- und Prüfverfahren zur Erfassung der Qualität von Komponenten und Subsystemen • Techno-ökonomische Effizienzsteigerung durch Komponenten- und Systemverbesserungen sowie ganzheitliche Betrachtung aller Kernkomponenten sowie Steuerung, Wartung und Betrieb • Kraftwerkskonzeptentwicklung unter Berücksichtigung aller Komponenten für linienfokussierende und punktfokussierende Systeme sowie integrierte Speicher

Die Integration solarthermischer Kraftwerke und Wärmespeicher in einen Verbund mit anderen erneuerbaren Energien ermögliche eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom und/oder Wärme. Solarthermische Kraftwerke mit einem integrierten thermischen Speicher können dazu beitragen, den Anteil erneuerbarer Energien an der Gesamtversorgung deutlich auszubauen. Auf diese Weise vermögen die Anlagen, witterungs- und tageszeitunabhängig Strom bedarfsgerecht zu erzeugen. Eine weitere Möglichkeit sei die einfache Erweiterung des Kraftwerks um solche Dampferzeuger, die auch parallel mit Biomasse und/oder Abfallstoffen befeuert werden können. Damit würde der Kraftwerksblock doppelt genutzt. Mittel- und Hochtemperaturwärme mithilfe konzentrierter Solarsysteme für Industrie, Kühlung und weitere Anwendungen bereitzustellen, könne künftig eine wichtigere Rolle spielen¹⁶².

In folgenden Bereichen sollte die Forschung, so die Akteure, künftig Schwerpunkte setzen: Konzepte und Pilotprojekte zur verbrauchsorientierten Energiebereitstellung seien technologieübergreifend und kostenoptimiert zu entwickeln. Dabei sollen sie mit anderen Energiequellen wie Photovoltaik, Wind, Biomasse und -gas, Wasserkraft etc. kombiniert werden. Weiterhin wäre es wichtig, solarthermische Kraftwerke zum „solaren Spitzenlastkraftwerk“ mit hohem Wirkungsgrad bei hoher Flexibilität weiterzuentwickeln, um Mittel- und Hochtemperaturwärme für industrielle Prozesse, solare Kühlung und Nah- und Fernwärme bereitstellen zu können. Dabei stehe erneut die Speicherung, In-

¹⁶² [H8] (AG3)

tegration und Anpassung an die Anforderungen industrieller Prozesse sowie die Erarbeitung standardisierter wettbewerbsfähiger Konzepte im Mittelpunkt¹⁶³. Um diese Ziele zu erreichen, seien Konzeptstudien sowie Demonstrations- und Pilotanlagen besonders geeignet.

Damit elektrische Energie aus solarthermischen Kraftwerken planbar, netzstabilisierend und kostengünstig ins Netz eingespeist werden kann, bedürfe es einer ganzheitlichen Systemoptimierung. Die dazu nötigen Kostensenkungen beträfen alle Bereiche: die Betriebsflexibilität, die ganzheitliche Betrachtung aller Kernkomponenten (Solarfeld, Receiver, Speicher, Kraftwerksblock) einschließlich der Steuerung sowie Betrieb und Wartung¹⁶⁴.

Daraus resultierten diese neuen Forschungsschwerpunkte: Komponenten und Systeme sowie Salzschnmelzen und andere Hochtemperaturfluide für linienfokussierende Systeme sollen weiterentwickelt werden. Um die Kosten weiter zu senken und die Wirkungsgrade zu steigern, werden innovative Heliostatfelder, optimierte linienfokussierende Kollektoren und verbesserte Receivertechnologien¹⁶⁵, fortschrittliche Speicherkonzepte und Kraftwerksblöcke benötigt. Auch eine verbesserte Betriebsweise biete noch Möglichkeiten. In diesem Kontext seien z. B. innovative Kollektorkonzepte mit präzisen, kostengünstigen Antrieben, hoher Reflektivität, autarke Kollektorkonzepte sowie hochtemperatur- und zyklenbeständige Materialien für Receiver zu entwickeln. Die Heliostatenentwicklung, -feldoptimierung und -feldsteuerung müssten ergänzend hinzukommen¹⁶⁶. Des Weiteren gehe es bei den thermischen Speicherkonzepten um verbesserte Lade- und Entladedynamik, erweiterte Temperaturbereiche sowie höhere Speichereffizienz bei gleichzeitiger Kostensenkung. Dies betreffe insbesondere Feststoffspeicher, Flüssigsalzspeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher für Temperaturen von mehr als 150 °C. Bezüglich der Speichertechnologie soll der Fokus auf der Material- und Komponentenentwicklung, alternativen Wärmeträgermedien, Wärmetransport, Thermochemie, Thermochemie und Systemintegration liegen. Darüber hinaus sei es notwendig, Turbinen für ihren Einsatz in solarthermischen Kraftwerken weiter zu optimieren¹⁶⁷.

Um die Effizienz in technischer und ökonomischer Hinsicht weiter zu steigern, sprechen sich die Akteure für angewandte Forschung und Demonstrationsvorhaben sowie Studien zur Systemanalyse und Optimierung aus¹⁶⁸. Bei solarthermischen Kraftwerken könne die Nutzung neuer digitaler Technologien Perspektiven eröffnen, die Kosten zu minimieren sowie Effizienz und Zuverlässigkeit zu steigern. Dies gelte besonders vor dem Hintergrund, dass deutsche mittelständische Unternehmen in diesem Bereich weltweit eine Vorreiterrolle einnehmen¹⁶⁹. Da solarthermische Kraftwerke neben standortspezifischen Faktoren auch viele universelle Merkmale aufwiesen, müsse untersucht werden, inwieweit digitale Planungsverfahren, wie beispielsweise das Building Information Modelling (BIM) aus dem Gebäudebereich, auch bei der solarthermischen Kraftwerkstechnik zur Anwendung kommen können. Damit könnte letztendlich eine virtuelle Version des Kraftwerks entstehen, mit dessen Hilfe sich Anlagen weiter optimieren und Schulungen durchführen lassen¹⁷⁰.

¹⁶³ [H8] (AG3)

¹⁶⁴ [H8] (AG3)

¹⁶⁵ [I1]

¹⁶⁶ [H8] (AG3)

¹⁶⁷ [H8] (AG3)

¹⁶⁸ [H8] (AG3)

¹⁶⁹ [H8] (AG3)

¹⁷⁰ [H8] (AG3)

Aus Sicht der Forschung bestehen in der solarthermischen Kraftwerkstechnik weitere Einsatzbereiche von digitalen Technologien in den Bereichen additiver Fertigungsverfahren für Komponenten. Moderne Datenverarbeitungstechnik eröffne darüber hinaus bei der Auswertung großer Datenmengen neue Chancen. Ein Beispiel sei die hochauflösende Datenerfassung mittels Flugdrohnen, um Betriebs-, Verschmutzungs- und Degradationsstadien bei Receivern und kompletten Solarfeldern zu ermitteln. Gleiches gelte auch für hochaufgelöste Wetterdaten, wie der Direktstrahlung, der Staubbelastung und der Windgeschwindigkeit, die zur optimierten Anlagen- und Feldsteuerung beitragen können. Weitere Anwendungen ergäben sich für die Entwicklung von Fernüberwachungs- und -steuerungssystemen zur Erhöhung von Verfügbarkeit, Verlängerung der Komponentenlebensdauer und Gesamtsystemoptimierung¹⁷¹.

Die Akteure erwarten, dass das Konzept CSP 4.0 dazu beiträgt, neue Produkte deutscher Hersteller auf den Markt zu bringen, Entwicklungszyklen zu verkürzen sowie neue Wartungskonzepte und geringere Planungs- und Bauzeiten und -kosten zu ermöglichen. Sie befürworteten, auch künftig an angewandten Forschungsvorhaben, der Verifizierung an Testanlagen und kommerziellen Systemen sowie der Vorserienentwicklung und Demonstrationsvorhaben festzuhalten¹⁷².

Ein wesentliches neues Forschungsfeld sei die standardisierte Entwicklung von Mess- und Prüfverfahren zur Erfassung der Qualität von Komponenten und Subsystemen. Auf diese Weise bestehe die Möglichkeit, technische Risiken und Kosten bei der Integration in ein komplexes Kraftwerkssystem abschätzen zu können. Dies sei besonders für deutsche Hersteller und Lieferanten von erheblichem Interesse, um die Exportprodukte weltweit qualitativ vergleichbar anbieten zu können¹⁷³.

Solarthermische Kraftwerke bestehen aus einer Vielzahl einzelner Komponenten unterschiedlicher Hersteller. Um zuverlässig die erwarteten Erträge solcher komplexer Systeme prognostizieren zu können, sollten Komponenten- und Subsystemeigenschaften definiert und standardisierte Messverfahren entwickelt werden. Eine Überprüfung und Bewertung könne nur dann vorgenommen werden, wenn beide Anforderungen erfüllt seien, wie dies bei konventionellen Kraftwerken seit langem der Fall sei. Für die noch junge solarthermische Kraftwerkstechnik gewannen sie zunehmend an Bedeutung und seien angesichts der Konkurrenz auf dem Weltmarkt unabdingbar. Denn nur auf der Basis einer entsprechenden Standardisierung seien Generalunternehmer in der Lage, die Wirtschaftlichkeit einer geplanten Anlage einzuschätzen und die Angebote von Komponentenherstellern zu bewerten. Auf diese Weise würden nicht zuletzt Transparenz und Zuverlässigkeit der Systeme vergleichbar, der Wettbewerb befördert und damit letztlich bei erhöhter Qualität die Kosten gesenkt¹⁷⁴.

Erforderlich seien besonders Mess- und Prüfverfahren für Komponenten und Subsysteme. Bei Solarturmkraftwerken betreffe dies z. B. die Leistungsfähigkeit und Lebensdauer der Heliostaten und Heliostatfelder, die Eigenschaften optischer Schichten auf Hochtemperatur-Receiverflächen und die Kompatibilität von Receiverkomponenten mit Wärmeträgerfluiden. Für linienfokussierende Systeme gelte es vor allem, die Messverfahren für die Leistungsprüfung im Solarfeld und die Qualifizierung der Receiver und gegebenenfalls der Sekundärspiegel weiterzuentwickeln. Darüber hinaus seien Messverfahren zur Bestimmung der Diffusion von Wasserstoff in das evakuierte Hüllrohr des Receiverroh-

¹⁷¹ [H8] (AG3)

¹⁷² [H8] (AG3)

¹⁷³ [H8] (AG3)

¹⁷⁴ [H8] (AG3)

res als Lebensdauereigenschaft zu entwickeln. Ebenso sei eine standardisierte Bewertung der Leistungsfähigkeit von Speichermaterialien und -systemen erforderlich. Für eine erfolgreiche Umsetzung empfehle es sich, die Forschung mit den entsprechenden internationalen Initiativen abzustimmen, wie IEA SolarPACES¹⁷⁵.

Solarthermische Kraftwerke böten sowohl bei Strom als auch bei Wärme erhebliche Potenziale für Power-to-Liquid-Prozesse¹⁷⁶ und für die Bereitstellung von Prozesswärme für industrielle Zwecke, wie z. B. die Düngemittelindustrie. Diese Einsatzgebiete seien derzeit noch weit von der Marktreife entfernt. In Zukunft werden sie aber stärker in den Fokus der solarthermischen Kraftwerksforschung und -entwicklung gelangen¹⁷⁷.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Derzeit lägen, nach Ansicht der Befragten, die zentralen Entwicklungshemmnisse in den mangelnden Standardisierungen und den damit verbundenen Qualitätsmaßstäben. Dies führe dazu, dass deutsche Unternehmen die hohe Qualität ihrer Produkte nicht angemessen darstellen könnten. Für diesen Bereich sei die Einhaltung bestehender Standards für die Vergleichbarkeit konkurrierender Produkte und Systeme, für die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen und für die Finanzierung neuer Standorte von großer Bedeutung¹⁷⁸.

¹⁷⁵ [H8] (AG3)

¹⁷⁶ [C3]

¹⁷⁷ [H8] (AG3)

¹⁷⁸ [H8] (AG3)

3.6 Konventionelle thermische Kraftwerke

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Konventionelle thermische Gas- und Dampfkraftwerke stellen eine bedarfsgerechte Erzeugung von Strom und Wärme sicher. Sie bilden im Stromnetz das Rückgrat der sogenannten Residuallast, decken viele Systemdienstleistungen ab und müssen immer stärker wechselnden Beanspruchungen standhalten. Dies führt dazu, dass konventionelle thermische Kraftwerke besondere Anforderungen hinsichtlich der Flexibilität ihrer Fahrweise erfüllen müssen¹⁷⁹. Die hiermit unterstützte Flexibilität bezeichnen die Akteure in ihrem Positionspapier als eine der drei Säulen für einen wirksamen Klimaschutz¹⁸⁰.

Zu den thermischen Kraftwerken gehören vor allem Gas- und Dampfkraftwerke, die mit festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen betrieben werden und deren thermische Energie in Strom und Wärme umgewandelt wird¹⁸¹. In jüngerer Zeit hinzugekommen sind Anlagen auf Basis neuer Prozessvarianten und Hybridkonzepte, z. B. zur Integration erneuerbarer Strom- und Wärmeerzeugung mit Power-to-X-Prozessen¹⁸², der Einsatz erneuerbarer Brennstoffe¹⁸³ sowie die Kombination von thermischen Kraftwerken mit örtlichen Speichern¹⁸⁴.

Da Deutschland nach Einschätzung der Akteure industriell und wissenschaftlich in vielen Kraftwerksparthen eine weltweit führende, technologische Position einnimmt und bereits Erfahrungen mit veränderten Betriebsweisen sammeln konnte, leisten Ergebnisse aus Forschungsvorhaben einen wichtigen Beitrag zum bestehenden und künftigen Exporterfolg effizienter, ressourcenschonender und damit CO₂-armer deutscher Kraftwerkstechnik¹⁸⁵. Auf diese Weise könne die deutsche Industrie auch bei der Energiewende anderer Volkswirtschaften auf ein entsprechendes Portfolio an Kenntnissen und Erfahrungen zurückgreifen und den Übergang erfolgreich mitgestalten¹⁸⁶. Darüber hinaus falle hocheffizienten flexiblen Kraftwerken eine hohe wirtschaftliche Bedeutung und Wertschöpfung zu¹⁸⁷.

□ Entwicklungsziele

- Flexibilisierung hinsichtlich fester und gasförmiger Brennstoffe, insbesondere auch von Biomasse, Abfällen, Ersatzbrennstoffen in Dampfkraftwerken¹⁸⁸ sowie von Wasserstoff und synthetischen Brennstoffen in Gaskraftwerken¹⁸⁹ für Power-to-X-to-Power Technologien bzw. „Rückverstromung“¹⁹⁰
- Flexibilisierung des Betriebes durch Reduzierung der Mindestlast, Erhöhung der positiven und negativen Lastgradienten, Verkürzung der An- und Abfahrzeiten¹⁹¹

¹⁷⁹ [A3]; [C2]; [C4]; [D1]; [H8] (AG1); [I1]

¹⁸⁰ [E6]

¹⁸¹ [H8] (AG1)

¹⁸² [A1]; [H8] (AG1)

¹⁸³ [A3]; [B2]; [D1]; [H1]; [H8] (AG1)

¹⁸⁴ [H8] (AG1)

¹⁸⁵ [A3]; [C2]; [H8] (AG1)

¹⁸⁶ [A3]; [H8] (AG1)

¹⁸⁷ [A3]; [C2]

¹⁸⁸ [A3]; [H1]; [H8] (AG1);

¹⁸⁹ [H8] (AG1)

¹⁹⁰ [A1]; [A2]; [A3]

¹⁹¹ [A3]; [H8] (AG1)

- Minderung der CO₂-Emissionen, Erhöhung des Wirkungsgrades auch unter besonderer Berücksichtigung industrieller Prozesse¹⁹²
- Emissionsminderungen für Quecksilber und Stickoxide¹⁹³
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, z. B. durch Polygeneration¹⁹⁴.
- Verbesserung der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Komponenten¹⁹⁵

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren genannten Themen sind zum Teil aktuelle Schwerpunkte des laufenden Energieforschungsprogramms, denen auch zukünftig eine wichtige Rolle zukommen soll. Hierzu zählen insbesondere Maßnahmen zur weiteren Effizienzsteigerung, Flexibilisierung und Minderung der CO₂-Emissionen¹⁹⁶. Dies schließt auch verwandte industrielle Branchen wie die Stahl- und die Zementindustrie ein¹⁹⁷. Darüber hinaus benannten die Akteure auch eine Reihe neuer Forschungsthemen, die im laufenden Programm noch nicht aufgeführt waren. Die folgende Tabelle stellt die vorgeschlagenen neuen Forschungsschwerpunkte und die bereits im früheren Programm enthaltenen Förderbereiche gegenüber, die in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren als weiterhin wichtig eingestuft werden.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung neuer Kreisprozesse und hybrider Anlagenkonzepte • Dezentrale modulare Kraftwerksanlagen mittlerer Leistungsklasse; kollektive Erzeugungseinheiten als virtuelle Kraftwerke, Vernetzung, IT-Sicherheit • Entwicklung von Online-Messtechniken • Entwicklung additiver Fertigungsverfahren • Big Data, Sensorik: Lebensdauermodelle, Zustandsbewertungen, Nutzung von Flottendaten, virtueller Zwilling, Machine-Learning 	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoff- und Prozessflexibilität • Kraftwerkseinsatzkonzepte zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit • kraftwerksseitige Speichersysteme, vor allem thermische Energiespeicher • Materialentwicklung, -ertüchtigung und -technologien • Emissionsminderung • Betriebsoptimierung und Systemintegration

Bei der Integration der erneuerbaren Energien steigen die technischen Anforderungen hinsichtlich der Betriebsflexibilität. Dies erfordert nach Ansicht der Akteure eine Vielzahl neuer Entwicklungen. So seien Maßnahmen zur Absenkung der Mindestlast, Steigerung der möglichen Lastgradienten und Verkürzung von Heiß- und Kaltstartzeiten erforderlich. Hierbei gelte es, neben den erforderlichen Betriebskonzepten die Auswirkungen auf die Lebensdauer beispielsweise von Dampferzeugern und

¹⁹² [D1]; [H8] (AG1); [A3]

¹⁹³ [H8] (AG1)

¹⁹⁴ [H8] (AG1); [D1]; [A1]

¹⁹⁵ [H8] (AG1)

¹⁹⁶ [A1]; [C2]; [D1]; [H8] (AG1)

¹⁹⁷ [A3]

dickwandigen Bauteilen zu untersuchen. Daraus ergäben sich Entwicklungsschwerpunkte im Bereich Werkstoffe und Lebensdauer sowie Wartungs-, Reparatur- und Ersatzmaßnahmen. Diese werden benötigt, um den aus der Energiewende resultierenden veränderten Betriebszyklen bestehender, ursprünglich auf dauerhaften Volllastbetrieb ausgelegter Kraftwerke (Retrofit) standzuhalten¹⁹⁸. Für den optimalen Brennstoffeinsatz seien Brennstoffanalysen notwendig und im Hinblick auf eine zunehmende Verschärfung von gesetzlichen Grenzwerten sei die Emissionsmesstechnik weiter zu entwickeln¹⁹⁹.

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren sprachen sich die Akteure vor dem Hintergrund einer zunehmenden Flexibilisierung, Effizienz und Verfügbarkeit thermischer Kraftwerke für die Erarbeitung von Konzepten und Komponenten in folgenden Themenfeldern aus:

- Integration zusätzlicher neuartiger, vor allem thermischer Energiespeicher in den Kraftwerksprozess und die Nutzung bereits im Kraftwerk vorhandener Speicher wie Speisewasserbehälter²⁰⁰
- Entwicklung neuer Kreisprozesse und hybrider Anlagenkonzepte wie Integration von Gasturbinen, Gasmotoren und/oder Speichern an Erneuerbaren-Energien-Anlagen²⁰¹
- Tri-Generation (Strom, Wärme, Wasserstoff) zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit²⁰²
- Dezentrale modulare Kraftwerksanlagen mittlerer Leistungsklasse²⁰³
- Kollektive aus zentralen und dezentralen Erzeugungseinheiten (virtuelle Kraftwerke)²⁰⁴
- Kraftwerkseinsatzkonzepte für eine Netz- und Kapazitätsreserve zur Sicherstellung einer volkswirtschaftlich kosteneffizienten Versorgung mit Regelenergie und weiteren Systemleistungen²⁰⁵

Diese Themen sollten nach Meinung der Akteure im Rahmen von Test-, Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie technisch-ökonomischen Evaluationen, analytischen Untersuchungen und Simulationen beforscht werden²⁰⁶.

Brennstoffe, deren Aufbereitung und Verbrennung sowie die Qualität der Technologien zur Emissionsminderung haben wesentlichen Einfluss auf die Klima- und Umweltbilanz thermischer Kraftwerke. Deshalb sehen die Akteure folgenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf beim Einsatz verschiedener Brennstoffe:

- Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb (Effizienz, Verschmutzung, Korrosion, Emissionen)²⁰⁷

¹⁹⁸ [H8] (AG1)

¹⁹⁹ [H8] (AG1)

²⁰⁰ [H8] (AG1)

²⁰¹ [H8] (AG1)

²⁰² [A1]

²⁰³ [H8] (AG1)

²⁰⁴ [H8] (AG1)

²⁰⁵ [A3]; [H8] (AG1)

²⁰⁶ [A3]; [H8]

²⁰⁷ [H8] (AG1)

- Aufbereitung und (Mit-) Verbrennung von regenerativ hergestellten Brennstoffen, Biomasse, Abfallverbrennung und Ersatzbrennstoffe²⁰⁸
- Verbrennung von Wasserstoff, synthetischen Brennstoffen zur „Rückverstromung“ und Biokraftstoffen in Gaskraftwerken²⁰⁹
- Emissionsminderung von Stickoxiden und Quecksilber²¹⁰
- Entwicklung von Online-Messtechniken²¹¹
- Automatisierung und Optimierung von Betriebsweisen²¹²

Die genannten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderten im Wesentlichen Versuche in Labor-, Pilot- und Demonstrationsanlagen. Darüber hinaus seien Brennstoffanalysen, Modellbildungen, Simulationen und Messkampagnen an Kraftwerken für die Entwicklungen von großer Bedeutung²¹³.

Durch die veränderte Beanspruchung von Kraftwerken werden bei den Werkstoffen Neuentwicklungen notwendig, so die Akteure. So seien ermüdungs- und langzeitstabile sowie fehlertolerante, funktionale Werkstoffsysteme und fortschrittliche Lebensdauermodelle erforderlich. Um diese Ziele zu erreichen, bestehe Forschungsbedarf zu diesen Themen:

- Entwicklung ermüdungs- und langzeitstabiler Legierungen, Verbundwerkstoffe und Schutzschichten²¹⁴
- Additive Fertigungsverfahren, geeignete Schweißverfahren²¹⁵
- Messverfahren und Sensoren zur Ermittlung der Belastung im Betrieb²¹⁶
- Fortschrittliche Lebensdauermodelle, Zustandsbewertung und Restlebensdauerbestimmung für kritische Komponenten, Nutzung von Flottendaten (Big Data)²¹⁷
- Maßnahmen und Werkstoffoptionen zu Reduktion von Korrosion und Verschmutzung²¹⁸

Neben Versuchen im Labormaßstab erfordere dies Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie Messkampagnen für die Modellbildung und für Simulationen²¹⁹.

Die Digitalisierung erschließt aus Sicht der Forschung neue Potenziale im industriellen Sektor und vereint physikalische Prozesse mit der digitalen Welt. Im Rahmen des zugehörigen Konzepts Industrie 4.0 seien in der Kraftwerkstechnik mit zunehmender Automatisierung präzisere Vorhersagen hinsichtlich aller Belastungen von Komponenten und Materialien möglich. Durch die vollständige Simulation realer Anlagen könnten Fahrweise und Wartung über den Lebenszyklus optimiert werden. Digitale Messverfahren, Auslegungs- und Herstellungsprozesse ermöglichten neuartige Fertigungstechnologien, wie additive Fertigung, neuartige Strukturen mit veränderten Materialien bis hin zur

²⁰⁸ [D1]; [H1]; [H8] (AG1)

²⁰⁹ [A2]; [A1]; [A3]; [D1]; [H8] (AG1)

²¹⁰ [H8] (AG1)

²¹¹ [H8] (AG1)

²¹² [A3]; [H8] (AG1)

²¹³ [A3]; [H8]

²¹⁴ [A1]; [A3]; [H8] (AG1)

²¹⁵ [H8] (AG1)

²¹⁶ [H8] (AG1)

²¹⁷ [H8] (AG1)

²¹⁸ [H8] (AG1)

²¹⁹ [A3]; [H8]

Visualisierung kompletter Anlagen. In diesem Zusammenhang werden folgende Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung genannt:

- Intelligente Sensorik für Kraftwerke, Verknüpfung und Auswertung großer Datenmengen unterschiedlicher Systeme und Strukturen²²⁰
- Lebensdauerbewertung: digitale Materialdatenaufbereitung, probabilistische Beschreibungen, numerisch gestützte Ansätze in Regelwerken und Richtlinien (CAR – Computer Aided Reliability“)²²¹
- Betriebsoptimierung sowie zustandsbasierte und vorausschauende Wartung mittels Virtuellem Zwilling, On-Site-Anlagensimulation, Betriebsdatenanalyse, Prozessgüteüberwachung und Machine-Learning-Algorithmen²²²
- Optimierte Bauteilstrukturen durch digital integrierte Auslegungs- und Herstellungsprozesse und additive Fertigung²²³
- IT-Sicherheit für thermische Kraftwerke insbesondere auch bei deren Vernetzung und für virtuelle Kraftwerke²²⁴

Der angewandten und interdisziplinären Forschung von Ingenieurwissenschaften, Mathematik und Informatik falle hinsichtlich der anstehenden Herausforderungen eine besondere Bedeutung zu. Dabei sei die Umsetzung digitaler Lösungsansätze in geeigneten Pilot- und Demonstrationsprojekten zu validieren²²⁵. Der Forschungsbedarf für flexible Kraftwerkstechnik wurde in einer nicht repräsentativen Meinungsumfrage unter Experten²²⁶ als „hoch“ eingestuft, die Gesamtpriorität für die Energieforschung in anderen Positionspapieren als mittel²²⁷ bzw. schwach positiv²²⁸ eingeschätzt.

Daneben regen einzelne Akteure an, die zukünftige Rolle von ehemaligen Großkraftwerksstandorten, (auch von Kernkraftwerken) hinsichtlich Ihrer Bedeutung für das Stromnetz zu untersuchen²²⁹.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren wird der konventionellen thermischen Kraftwerkstechnik bereits ein hohes Maß der Anpassung an die veränderten Randbedingungen einer flexiblen Betriebsweise attestiert. Es sei allerdings zu erwarten, dass sich diese Anforderungen auf Grund des weiteren Ausbaus der regenerativen Energieerzeuger weiter verschärfen werden, was den Wettbewerbsdruck auf Investitions- und Betriebskosten deutlich erhöhe²³⁰.

²²⁰ [A3]; [H8] (AG1)

²²¹ [H8] (AG1)

²²² [H8] (AG1)

²²³ [H8] (AG1)

²²⁴ [A3]; [H8] (AG1)

²²⁵ [A3]; [H8]

²²⁶ [C4]

²²⁷ [C3]

²²⁸ [C4]

²²⁹ [A1]

²³⁰ [H8] (AG1)

3.7 Motoren und Turbinen

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren bezeichnen die Akteure die Turbomaschinentechnologie als eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende, die in vielfältigen Anwendungen zum Wandeln, Speichern und Transportieren erneuerbarer Energien benötigt wird. Eine Hauptanwendungsstelle demnach die Energieumwandlung in thermischen Kraftwerken durch Turbinen mit einer hohen Leistungsdichte dar, wobei in kleineren Leistungsklassen und dezentralem Einsatz auch Verbrennungsmotoren eine Alternative seien.

So garantierten Gas- und Dampfturbinen in den konventionellen Kraftwerken in Deutschland und der übrigen Welt noch auf Jahrzehnte Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Netzstabilität durch die Bereitstellung der von den fluktuierenden erneuerbaren Energien nicht abgedeckten Residualleistung. Bei dem nachhaltigen Übergang hin zur regenerativen Energieerzeugung seien die Bestands- und Neuanlagen an die nötige Betriebs- und Brennstoffflexibilität anzupassen. Dabei falle der Verstromung von regenerativ hergestelltem Wasserstoff zukünftig eine wichtige Rolle zu²³¹. Dampfturbinen würden in GuD- und Kohlekraftwerken, KWK-Anlagen, der Hochtemperatur-Solarthermie²³² und der Geothermie²³³ zur Stromerzeugung eingesetzt. Sie seien daher für dezentrale Erzeugungs- und Verteilungssysteme unverzichtbar.

In modularen oder hybriden Kraftwerken und im dezentralen Einsatz seien hochflexible Gasturbinen mittlerer Leistung, Mikrogasturbinen und Gasmotoren zur Strom- und Wärmebereitstellung erforderlich. Sie ermöglichten bei einem zunehmenden Anteil von synthetischen und biologischen Kraftstoffen und Wasserstoff die Integration der erneuerbaren Energien²³⁴. Das Potenzial von Mini-Blockheizkraftwerken werde dabei noch nicht ausgeschöpft²³⁵.

Die in Dampfkraftwerken für den Wasser-Dampfkreislauf benötigten großen Kraftwerkspumpen seien technologisch verwandte hydraulische Turbomaschinen. In Großkraftwerken verursachen sie einen signifikanten Anteil am energetischen Eigenbedarf, seien aber bisher nicht für einen flexiblen Betrieb optimiert. Des Weiteren würden Turbokomponenten in einer Vielzahl von innovativen Prozessen eingesetzt, wie Verdichtung und Expansion in Druckluftspeichern, als Bestandteil von Power-to-X-to-Power-Prozessen und für den Transport von Gasen, wie beispielsweise CO₂²³⁶.

Der wirtschaftliche Erfolg der deutschen Turbomaschinenindustrie werde größtenteils im Export erzielt, womit die heimische Turbomaschinenentwicklung einen wesentlichen Anteil an der Bewältigung der globalen Herausforderungen des Klimaschutzes trage. Die langjährige gezielte Forschung und Entwicklung in Deutschland habe neben der Technologieführerschaft auch zu einer internationalen Spitzenposition der deutschen Forschungslandschaft geführt²³⁷.

²³¹ [A1]

²³² [H8] (AG5)

²³³ [C6]

²³⁴ [H8] (AG5)

²³⁵ [A1]

²³⁶ [H8] (AG5)

²³⁷ [H8] (AG5)

□ Entwicklungsziele

- Gasturbinen (bis 2030): Halbierung der Anfahrzeiten, Halbierung der Teillastverluste bei einer Absenkung der emissionskonformen Teillast auf 20 %, H-Anteil im Brennstoff von heute < 10 % auf 100 %, gleichzeitig Erhöhung des Wirkungsgrades im GuD Betrieb von aktuell erreichbaren 60 – 62 % auf 65 % und im KWK-Betrieb über 85 %²³⁸
- Dampfturbinen: Anpassung an Belastung durch flexiblere Betriebsweise bei Erhaltung oder Erhöhung der Lebensdauer, gleichzeitig Beibehaltung oder Erhöhung des Wirkungsgrades für den Einsatz in GuD, KWK, Biomasse und CSP Kraftwerken²³⁹
- Hydraulische Turbomaschinen: Optimierung von Kraftwerkspumpen und deren Regelungen für einen flexiblen Betrieb und eine Reduzierung des Energiebedarfs für den Teillastbetrieb²⁴⁰
- Hochflexible Gasturbinen (< 50 MW) und Mikrogasturbinen (1 kW – 1 MW) bis 2030: Wirkungsgradsteigerung um 5 % für hochflexible Gasturbinen und um 10 % für Mikrogasturbinen, Verstromung von synthetischen und regenerativen Brennstoffen effizient und schadstoffarm im Lastfolgebetrieb²⁴¹

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Akteure stufen die Entwicklung und Fertigung von Turbomaschinen als eine anspruchsvolle Hochtechnologie ein. Künftige technische Verbesserungen erforderten eine erhebliche Steigerung des Einsatzes digitaler Verfahren. Dieses betreffe zum einen komplexere Simulationsverfahren für die Entwicklung, die mit einem hohen Rechenaufwand einhergingen. Des Weiteren seien digitale Konstruktions-, Fertigungs- und Zustandsüberwachungsprozesse mit dem Ziel einer möglichst hohen Integration (CAx-Integration, Digital Twin) zu entwickeln. Zum Einsatz kämen dabei Methoden wie Künstliche Intelligenz, Machine Learning, Neuronale Netze und Big Data. Neben solchen neuen Forschungsschwerpunkten, die in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren zum Konsultationsprozess genannt werden, wird auch die Fortführung von Forschungs- und Entwicklungsbereichen empfohlen, die bereits im laufenden Energieforschungsprogramm gefördert wurden. Die folgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der wichtigsten neuen und der aus dem laufenden Programm fortzuführenden Forschungsbereiche.

²³⁸ [H8] (AG5)

²³⁹ [H8] (AG5)

²⁴⁰ [H8] (AG5)

²⁴¹ [H8] (AG5)

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Verfahren, hochauflösende und multidisziplinäre Simulationsverfahren • Konstruktive Optionen durch additive Fertigung • Neue Kraftwerkskonzepte durch Integration von hochflexiblen Gasturbinen < 50 MW, Mikrogasturbinen, Gasmotoren • Flexibilisierung von hydraulischen Kraftwerksaggregaten • Turbomaschinen für Kreisläufe mit superkritischem CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Brennstoffflexibilität, insbesondere hoher H-Anteil • H-Anteil, synthetische und regenerative Brennstoffe • Lebensdauerverbesserungen unter flexiblen Einsatzbedingungen, Schädigungsmechanismen • Reduktion von Schadstoffemissionen • Wirkungsgradverbesserung: Kühlung, Wärmedämmschichten, Dichtungskonzepte, neue Werkstoffe, Rekuperation • Turbinen, Verdichter- und Expander für regenerative Restwärmenutzung, CSP-Kraftwerke, Druckluftspeicherung, CO₂-Transport, neue Arbeitsmedien (H₂)

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Gasturbinen bestehe in der Optimierung von Komponenten (Verdichter, Brenner, Turbine) und des Gesamtsystems. Hierbei seien neben weiterhin wichtigen Themen, wie Kühlung, Wärmedämmschichten, Dichtungskonzepten und höherer Wirkungsgrade, folgende zukünftige Schwerpunkte bedeutsam²⁴²:

- Digitale Verfahren (hochauflösende und multidisziplinäre Simulationsverfahren)
- Neue konstruktive Optionen durch additive Fertigung
- Brennstoffflexibilität, insbesondere hoher H-Anteil
- Reduzierte Schadstoffemissionen auch unter flexiblen Betriebsbedingungen
- Sicherstellung einer hohen Lebensdauer, Untersuchung Schädigungsmechanismen

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei Dampfturbinen ergebe sich ebenfalls vor allem aus dem flexiblen Betrieb, der ein beschleunigtes Aufheiz- und Abkühlverhalten verlange. Dabei seien Effekte wie Resonanzen der instationär belasteten Endstufenschaufeln zu vermeiden. Wichtige Themen seien daher²⁴³:

- Technologien für robuste und effiziente Dampfturbinenschaufeln im flexiblen Betrieb (Schwingungen, Lebensdauerbestimmung)
- Optimierung des Turbineneinström- und -abströmdesigns für transienten Betrieb
- Verbesserte Dichtungskonzepte
- Neue Werkstoffe und Fertigungstechnologien

²⁴² [H8] (AG5)

²⁴³ [A3]; [H8] (AG5)

Bei hydraulischen Kraftwerksaggregaten bestehe, so die Autoren, folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf²⁴⁴:

- Hydraulik: Vermeidung von Kennlinieninstabilität, Reduzierung von Druckpulsationen, Optimierung des Kavitationsverhaltens
- Struktur/Festigkeit: Reduktion von Materialbelastungen durch strukturmechanische Optimierung, neue Gleitlagerkonzepte
- Leckage: Entwicklung von neuen Lagerungs- und Dichtungskonzepten, neue Wabengeometrie für Spaltdichtungen
- Monitoring: Überwachung der Energieeffizienz, Schadensfrüherkennung und -prognose

Bei hochflexiblen Gasturbinen und Mikrogasturbinen für den dezentralen Einsatz werden gegenüber großen Gasturbinen neben der Effizienzsteigerung²⁴⁵ unter anderem folgende weitere Forschungs- und Entwicklungsthemen²⁴⁶ genannt:

- Reduzierung von Spaltverlusten
- Hocheffiziente Verdichter für einen extrem dynamischen Betrieb
- Verbesserung der Rekuperation
- Integration in neue Kraftwerkskonzepte

Die im Konsultationsprozess genannten Anforderungen an Gasmotoren und darauf basierenden BHKWs für die Energiebereitstellung stimmen mit denen hochflexibler Gasturbinen und Mikrogasturbinen überein. Aufgrund der unterschiedlichen Technologie ergäben sich allerdings spezifische Ansätze für die weitere Forschung und Entwicklung²⁴⁷:

- Konzepte für effizienten und emissionsreduzierten Betrieb unter Nutzung von synthetischen und regenerativen Brennstoffen
- Modellierung des Gesamtsystems mit Fokus auf Komponenteninteraktion
- Optimierte Hybrid-Kraftwerke
- Flexibilisierungsmöglichkeiten im Haushaltssektor durch Wärme-Strom-Kopplung²⁴⁸

Die Forschungs- und Entwicklungsthemen von Turbomaschinen in innovativen Prozessen orientieren sich an den vielfältigen Anwendungen. Neben weiterhin wichtigen Optimierungen von Turbomaschinen für CSP-Kraftwerke und Verdichtern für den CO₂-Transport werden unter anderem folgende Punkte genannt²⁴⁹:

- Entwicklung von leistungsfähigen Verdichter- und Expanderstufen für großskalige Druckluftspeicherung und für neue Arbeitsmedien (H₂)
- Turbomaschinen für Kreisläufe mit superkritischem CO₂
- Verdichter und Expander für die regenerative Restwärmenutzung, z. B. ORC, Kalina-Prozess, Gichtgasexpander

²⁴⁴ [H8] (AG5)

²⁴⁵ [C4]

²⁴⁶ [H8] (AG5)

²⁴⁷ [H8] (AG5)

²⁴⁸ [C4]

²⁴⁹ [H8] (AG5)

- Anpassung von Tools der Kraftwerkstechnik für die Geothermie, z. B. Steigerung der Turbinenwirkungsgrade²⁵⁰
- Neue Turbinentechnologien, Brenneroptimierung Flexibilisierung und Effizienzsteigerung für Bioenergieanlagen²⁵¹

Die erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten seien der angewandten Forschung zuzuordnen. Dabei stellten experimentelle und numerische Verfahren in generischen und technologie-nahen Konfigurationen, Komponentenerprobung sowie Big Data, Prototypen und Demonstrationsanlagen zentrale Ansätze dar²⁵².

Die Höhe des Forschungsbedarfs für Gasturbinen und Gasmotoren wurde in einer nicht repräsentativen Meinungsumfrage unter Akteuren²⁵³ als „mittel“ eingestuft und der von Mikrogasturbinen und Wasserstoffturbinen uneinheitlich von „gering“ bis „hoch“. Den Technologiefeldern, zu denen auch BHKWs z. B. für energieeffiziente Gebäude und dezentrale Energiesysteme zählen, wird eine mittlere bis hohe Priorität für die Energieforschung zugeordnet²⁵⁴. Auch die Weiterentwicklung von Systemen zur kombinierten und flexiblen Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung (KWK/KWKK) halten die Akteure für erforderlich²⁵⁵.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Akteure erwarten hinsichtlich der Anwendung von Turbomaschinen in thermischen Kraftwerken, dass sich die Anforderungen an die Flexibilität bei gleichzeitig reduzierten Einsatzzeiten weiter verschärfen. Dieses führe sowohl zu erhöhten Investitions- als auch Betriebskosten²⁵⁶.

²⁵⁰ [C6]

²⁵¹ [H1]

²⁵² [H8] (AG5)

²⁵³ [I1]

²⁵⁴ [C2]; [C4]

²⁵⁵ [H4] (AG7)

²⁵⁶ [H8] (AG1)

3.8 Brennstoffzellen und Wasserstoff

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Um eine nachhaltige und wirtschaftliche Energieversorgung aus erneuerbaren Energiequellen flächendeckend zu erreichen und gleichzeitig die Rolle Deutschlands als weltweiten Marktführer der entsprechenden Technologien auszubauen, empfehlen die Akteure in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren, im Rahmen der Energieforschung Energiespeicher und speziell die Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Technologie weiterzuentwickeln. Wasserstoff spiele als Energieträger oder chemischer Grundstoff in vielen Zukunftsszenarien eine Rolle. Die Realisierung eines Energiesystems, das zu über 60 % auf fluktuierenden erneuerbaren Energien basiere, erfordere die langfristige Speicherung von großen Energiemengen. Daher seien Forschung und Technologieentwicklung zur Umwandlung fluktuierender erneuerbarer Energiequellen, z. B. Solarstrahlung oder Windenergie, in chemische Energieträger wie Wasserstoff unabdingbar²⁵⁷.

Wasserstoff, der mittels Elektrolyse und regenerativ erzeugtem Strom gewonnen wurde, könne direkt und effizient wieder in andere Energieformen überführt werden. Er diene somit als Speichermedium für große Mengen temporär überschüssigen Stroms in zentralen, auch langfristigen Speichern²⁵⁸. Außerdem bestünde die Möglichkeit, ihn in bestehenden Pipelinesystemen zu transportieren, um damit die Energieversorgung des Verkehrs sowie die Versorgungssicherheit zu gewährleisten²⁵⁹. Das würde gleichzeitig auch die Stromnetze entlasten.

Hierbei spiele die Brennstoffzelle als sehr effektiver und schadstofffreier Wandler von Wasserstoff in Strom eine zentrale Rolle²⁶⁰, auch wenn die Verwendung in Gaskraftwerken noch parallel erwähnt wird²⁶¹.

□ Entwicklungsziele

- Umwandlung vorhandener, aber temporär nicht benötigter elektrischer Energie in chemische Energie, z. B. Wasserstoff, als Alternative bzw. Ergänzung zum Stromleitungsausbau²⁶²
- Beschleunigung einer industrialisierten Produktion als Leitlinie für die zukünftige Forschungsförderung im Bereich Brennstoffzellen²⁶³
- Kostengünstige, breite Wasserstoffversorgung für eine verstärkte Anwendung von Brennstoffzellen²⁶⁴
- Weiterentwicklung von Power-to-Heat (Wärmepumpe, E-Heizer) und Power-to-Gas/Fuel Anwendungen (Elektrolyse, Methanolsynthese, Brennstoffzellen) für die Elektromobilität²⁶⁵

²⁵⁷ [A3]; [F3]

²⁵⁸ [A3]; [C2]; [C4]; [C8]; [H9]; [H10]

²⁵⁹ [C4]; [A1]

²⁶⁰ [A1]; [A3]; [C2]; [H10]

²⁶¹ [H8]

²⁶² [A3]; [B1]

²⁶³ [H10]

²⁶⁴ [C2]

²⁶⁵ [C2]; [I1]

- Systemvergleich verschiedener erneuerbar hergestellter Energieträger, wie Wasserstoff, Methanol, Methan, hinsichtlich ihrer Eignung zur Dekarbonisierung weiterer Sektoren (Langstreckenmobilität: Flugzeuge, Schiffe, Automobile; Langzeitspeicher; Industrie)²⁶⁶
- Entwicklung der technologischen Voraussetzungen für eine Steigerung des Wasserstoffanteils im Brenngas von heute < 10 bis auf 100 % im Jahr 2030 für eine energetisch günstige Rückverstromung aus Speichern²⁶⁷
- Verbesserte Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie Reduzierung der Systemkomplexität und -kosten als Voraussetzung für die erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellen; Entwicklung verbesserter, kostengünstiger Kernkomponenten wie Katalysatoren, Membranen und Elektroden notwendig²⁶⁸
- Kostenreduktion bei Brennstoffzellen durch eine Reduzierung der Platinbeladung²⁶⁹
- Erforschung und Entwicklung von flexiblen Vergaser-Brennstoffzelleneinheiten in allen relevanten Leistungsbereichen von wenigen kW bis in den MW-Bereich; Mittel- bis langfristige Marktverfügbarkeit erster Produkte einer Biomassevergasung in Kombination mit einem Brennstoffzellenbetrieb, der hohe Flexibilität zusammen mit elektrischen Jahresnutzungsgraden von über 50 % erlaubt (langfristig, 15 Jahre)²⁷⁰
- Förderung von Reallaboren und Demonstratoren zur Validierung der Marktreife und Bestimmung des marktgetriebenen Forschungsbedarfs (kurzfristig)²⁷¹
- Fokussierung auf System- und Marktintegration sowie Geschäftsmodelle gegenüber allein technologischen Lösungen (kurzfristig)²⁷²
- Entwicklung skalierbarer und hochdurchsatzfähiger Produktionstechnik als Voraussetzung für die Marktfähigkeit von Brennstoffzellen²⁷³

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Verlauf des Konsultationsprozesses haben die Akteure eine Vielzahl an neuen technologischen Herausforderungen identifiziert. Diese sollten für eine erfolgreiche Umsetzung von Brennstoffzellen untersucht und gelöst werden und bauen auf den derzeitigen Erfahrungen im Rahmen des laufenden Energieforschungsprogramms auf. Darüber hinaus benennen sie auch neue Forschungsthemen, die bisher noch nicht gefördert wurden. Die folgende Tabelle stellt beide Bereiche einander gegenüber.

²⁶⁶ [C3]

²⁶⁷ [H8]

²⁶⁸ [B2]; [C2]; [H10]; [C3]

²⁶⁹ [B1]

²⁷⁰ [H1]

²⁷¹ [A1]; [H10]

²⁷² [A1]

²⁷³ [H10]

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Demonstrationsvorhaben zur Validierung der Marktreife und Bestimmung des marktgetriebenen Bedarfs • Beschleunigung der Industrialisierung durch Reduzierung der Systemkomplexität und -kosten sowie Entwicklung skalierbarer, hochdurchsatzfähiger Produktionstechnik • Einsatz- und Betriebsführungsstrategien im Hausenergie- und Verkehrssektor; Geschäftsmodellentwicklung • Brennstoffzelle als Schlüsselkomponente einer wasserstoffbasierten Sektorenkopplung Energie (Strom, Wärme) und Verkehr • Entwicklung umkehrbar betriebener Brennstoffzellen zur Senkung der Investitionskosten • Erforschung der Wirksamkeit hybrider Systeme (Batterie, Turbine) • Entwicklung international akzeptierter und validierter Normen und Standards 	<ul style="list-style-type: none"> • Neuartige Materialien für Katalysatoren, Bipolarplatten/Interkonnektor, Membran/Elektrolyt und Elektroden/Zellen mit verbesserten Eigenschaften bei Lebensdauer, Wirkungsgrad und Kosten • Designs mit verbesserten Leistungs- und Kostendaten bei Zellen und Stacks • Technologien zur kosteneffizienten und reproduzierbaren Fertigung von Komponenten und Systemen • Technologien für kostengünstige Wasserstoffbereitstellung (Elektrolyse, Speichermaterialien und Tanks) • Optimierung der Reformer für gasförmige und flüssige Kraftstoffe • Verbesserte Methoden zur Lebensdauervorhersage und Qualitätssicherung

Die Forschungsförderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie sollte sich nach Ansicht der Akteure zu einem guten Teil darauf richten, marktfähige Produkte und Prozesse zu erreichen, die auch auf dem Weltmarkt wirtschaftlich und wettbewerbsfähig einsetzbar sind. Dabei sollte Interdisziplinarität angesichts der großen Herausforderungen ein wesentliches Ziel der Forschung sein²⁷⁴.

Grundsätzlich sei ein Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft wichtig. Technologien, beispielsweise zur flexiblen strombasierten Erzeugung von Wasserstoff verfügten hier über ein sehr hohes Potenzial. Einerseits ermöglichten sie die Aufnahme großer elektrischer Leistungen und Energiemengen und andererseits ließe sich Wasserstoff vielfältig sowohl energetisch als auch stofflich nutzen. Wasserstofftechnologien seien eine von mehreren Optionen zur Energiespeicherung²⁷⁵.

Im Rahmen des Konsultationsprozesses hat sich die Sektorkopplung (Strom, Wärme und Wasserstoff) als sehr wichtiger Forschungsschwerpunkt herauskristallisiert²⁷⁶. Die Wirtschaftlichkeit von Großkraftwerken, die weiterhin im Netz die überwiegende Regelleistung oder die Leistungsreserve auch langfristig zur Verfügung stellen müssten, ließe sich durch die Sektorkopplung gegebenenfalls verbessern. Daraus ergäbe sich zum einen eine höhere Auslastung dieser Kraftwerke, zum anderen ein Speichermedium, das in Zeiten hohen Strombedarfs genutzt werden könne. Forschungsthema sei

²⁷⁴ [D1]

²⁷⁵ [A3]; [C9]

²⁷⁶ [A3]; [B1]; [C2]; [I1]

hier vor allem die Wirtschaftlichkeit derartiger Kraftwerkssysteme²⁷⁷. Im Rahmen der Sektorkopplung sollten auch die Möglichkeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrads und zur Minderung der Investitionskosten von Brennstoffzellen für den Einsatz im Gebäudebereich untersucht werden²⁷⁸.

Die Erforschung von neuartigen sektorkoppelnden Hybridkonzepten sowie das Aufzeigen von Optimierungsparametern seien notwendig, um die weitere Verbreitung von Speichern zu begleiten und die Erschließung ihres potenziellen Nutzens zu beschleunigen. Dazu gehöre die Weiterentwicklung von Materialien zur Wasserstoffspeicherung (LOHCs, Metallhydride)²⁷⁹. Auch im Rahmen der Smart Grids gewannen derartige „Langzeitspeicher“ an Bedeutung. Daher seien Untertagespeicher für beispielsweise regenerativ erzeugtes Gas, wie z. B. Wasserstoff und regeneratives Methan, und deren Skalierbarkeit sowie Speicher an heutigen Kraftwerksstandorten ein wichtiges Thema für Forschung und Entwicklung²⁸⁰. Auch die Ertüchtigung vorhandener Kavernenspeicher für die Wasserstoffspeicherung und die Anhebung des möglichen Anteils von Wasserstoff in vorhandenen Gasnetzen seien zu untersuchen²⁸¹.

Die Akteure erachten insbesondere im Bereich der Biomasse-Vergasung und der Gasaufbereitung zum Einsatz in Brennstoffzellen eine Fortführung der Grundlagenforschung als notwendig. Parallel dazu seien aber schon heute Arbeiten im Bereich der angewandten Forschung und experimentellen Entwicklung zielführend, um neue Produkte zu entwickeln und für den dann folgenden Einsatz in Pilot- und Demonstrationsprojekten vorzubereiten²⁸². Dazu gehöre die Erforschung, Entwicklung und Optimierung von Gasaufbereitungsverfahren zum Einsatz in Brennstoffzellen, von flexiblen Vergaser-Brennstoffzelleneinheiten in allen relevanten Leistungsbereichen von wenigen kW bis in den MW-Bereich sowie von Range-Extendern und Brennstoffzellen auf Grundlage von Biokraftstoffen²⁸³.

Im Bereich der Brennstoffzellentechnologie bestehe weiterhin hoher Forschungsbedarf in folgenden Technologiefeldern: Festoxidbrennstoffzelle (SOFC)²⁸⁴, umkehrbar betriebene Brennstoffzelle, Systemintegration (inklusive Peripherie), Fertigung, hybride Systeme (Batterie, Turbine) und Wasserstoffspeicherung, -transport und -verteilung²⁸⁵. Für die Niedertemperatur-Polymerelektrolytbrennstoffzelle (NT-PEM) und Reformier für gasförmige und flüssige Kraftstoffe sei ein mittelhoher Forschungsbedarf erkennbar. Außerdem empfehlen die Akteure, die Forschung auf dem Gebiet der Hochtemperatur-Polymerelektrolytbrennstoffzellen (HT-PEM), die besonders für stationäre Anwendungen geeignet sind, fortzusetzen²⁸⁶. Bei der Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) hingegen sei der Forschungsbedarf gering²⁸⁷.

Des Weiteren haben sich im Rahmen des Konsultationsprozesses Forschungsaspekte von Material- bis hin zur Systementwicklung inklusive Modellierung und Prozessforschung als wichtig herauskristallisiert. Beispiele hierfür seien vor allem die elektrochemisch aktiven Komponenten wie Memb-

²⁷⁷ [A1]

²⁷⁸ [C3]

²⁷⁹ [H9]

²⁸⁰ [C8]

²⁸¹ [H9]

²⁸² [H1]

²⁸³ [H1]

²⁸⁴ [A1]

²⁸⁵ [I1]

²⁸⁶ [I1]

²⁸⁷ [I1]

ran/Elektrolyt, Katalysatorschichten oder poröse Lagen sowie Bipolar-/Separatorplatten inklusive Beschichtung und Fügen bis hin zu Dichtungsmaterialien. Daraus resultiere Forschungsbedarf zu Alterungsphänomenen durch bestimmte Betriebsbedingungen – besonders Start- und Stoppvorgänge sowie Froststarts – Kontaminationseffekte durch Kathoden- oder Anodenschadstoffe sowie durch Korrosionsvorgänge. Begleitend hierzu müssten Methoden zur schnellen und einheitlichen Bewertung von Materialien und Komponenten entwickelt werden und zwar mithilfe von in-situ- sowie zukünftig vor allem auch ex-situ-Analytik²⁸⁸.

Aus dem Ziel der Industrialisierung leite sich die Notwendigkeit einer Kostensenkung ab: Vor allem der Anteil der Katalysatoren als einer der wesentlichen Kostentreiber müsse gesenkt werden. Als weitere kostentreibende Peripheriekomponente seien die (Hochdruck-) Speicher, Rezirkulation, Kompression/Verdichter, Leistungselektronik und gegebenenfalls Gas- oder Wasseraufbereitung/Schadstofffilterung/Befeuchtung zu nennen. Gleichzeitig müsse unter Kostengesichtspunkten die Leistungsdichte erhöht werden, um Materialien einzusparen. Das erfordere weitere Materialanpassungen bis hin zu Neuentwicklungen und Kostenanalysen, um möglichen Materialeinsparungen die gegebenenfalls höheren Anforderungen an die Produktionsanlagen und die Qualitätssicherung gegenüberzustellen. Hinsichtlich der Systemkomponenten gelte es, heute bereits in großen Stückzahlen hergestellte Komponenten aus anderen Einsatzgebieten für den Einsatz in der Wasserstofftechnologie weiterzuentwickeln²⁸⁹.

Mit dem Markthochlauf seien Forschung und Entwicklung zu einer skalierbaren und hochdurchsatzfähigen Produktion von Komponenten, Stapeln, Peripheriekomponenten und Systemen voranzutreiben. Insbesondere stellten die – hinsichtlich der Stückzahlen – mehrere Größenordnungen überspringenden Produktionszahlen von der Markteinführung bis zum Massenmarkt besondere Herausforderungen an eine modulare und skalierbare Prozesstechnik dar. Ebenso gewinne die Qualitätssicherung z. B. mit zu entwickelnden online-Messverfahren an Bedeutung²⁹⁰.

Des Weiteren soll nach Ansicht der Akteure die Aufmerksamkeit auf die Betriebsführung des Komplettsystems gelegt werden, wobei Froststart, Lebensdauer, Effizienz und Wartung eine Rolle spielten. Dabei gelte es, Komplettsystemanalysen durchzuführen, da gegebenenfalls der Verzicht auf einzelne Komponenten zielführend sei oder der Einsatz optimierter Komponenten durch eine Erhöhung von Leistungsdichte und/oder Robustheit die Lebenszykluskosten senken könne. Im Zusammenhang mit der Betriebsführung seien Kostensenkung und Zuverlässigkeit der Sensorik durch Forschung und Entwicklung voranzutreiben²⁹¹.

Auch das Potenzial von stationären Brennstoffzellen zur Kraft-Wärme-Kopplung, z. B. Mini-Blockheizkraftwerke für Wohn- und Industriegebäude, solle weiter untersucht werden. Während technische Lösungen verfügbar seien, fehle es an einer Markteinführung wirtschaftlicher Produkte. Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC, die mit Erdgas betrieben werden kann, hat dabei das größte Wirkungsgradpotenzial. Neben den nach wie vor hohen Kosten bereite auch die begrenzte Lebensdauer noch Probleme²⁹². Weiterer Forschungsbedarf bestehe darin, eine möglichst national oder gar europäisch einheitliche Gasqualität zu erreichen bzw. solche Odorierungsmittel einzusetzen,

²⁸⁸ [H10]

²⁸⁹ [H10]

²⁹⁰ [H10]

²⁹¹ [H10]

²⁹² [A1]

welche in Brennstoffzellen keine Probleme bereiten²⁹³. Im Hinblick auf eine verbesserte Zusammenarbeit von Zulieferern und Systemintegratoren im In- und Ausland seien national wie international akzeptierte und validierte Normen und Standards erforderlich²⁹⁴.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Grundsätzlich spiegelt der Konsultationsprozess ein hohes Vertrauen in die Brennstoffzellentechnologie wider. Die Akteure beklagen jedoch die zu hohen Materialkosten²⁹⁵, bei den für mobile Anwendungen präferierten Typen. Hier sei ein erheblicher Entwicklungsbedarf erkennbar, insbesondere, wenn durch eine Reduzierung des Edelmetallgehalts negative Einflüsse auf andere Parameter vermieden werden sollten. Die Akteure befürchten, dass durch Änderungen verursachte Fehler erst nach langen, teuren Tests erkennbar seien²⁹⁶.

Trotz guter technischer Lösungen mangle es bei Mini-Blockheizkraftwerken an der Markteinführung wirtschaftlicher Produkte. Beispielsweise sind dank Subventionen Brennstoffzellen in japanischen Haushalten schon wesentlich weiter verbreitet als in Deutschland. Bei den in großer Zahl eingesetzten, mit Erdgas betriebenen Hochtemperatur-Brennstoffzellen SOFC bereite die begrenzte Lebensdauer noch Sorgen²⁹⁷. Bei der mobilen Anwendung auf der Basis erneuerbarer Energien bestünden Unsicherheiten hinsichtlich der Auswirkungen auf Strom- und zukünftige Wasserstoffnetze²⁹⁸. Hinzu komme als zentrales Hemmnis bei der Industrialisierung die heute noch nicht ausreichende Infrastruktur für Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe²⁹⁹.

²⁹³ [H10]

²⁹⁴ [H10]

²⁹⁵ [B1]

²⁹⁶ [H10]

²⁹⁷ [A1]

²⁹⁸ [B1]

²⁹⁹ [H10]

3.9 Energieoptimierte Gebäude (ohne Quartiere)

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In einem zukünftigen Energiesystem, das einen hohen Anteil an fluktuierenden erneuerbaren Energien aufweist, können aus Sicht der Akteure Gebäude nicht nur einen Beitrag zur Reduzierung des Primärenergiebedarfs leisten, sondern werden als ein wichtiges Instrument zur Stabilisierung der Energieversorgung gesehen³⁰⁰. Die Herausforderung bestehe darin, dass Gebäude keine Massenprodukte seien, sondern als Unikate errichtet und individuell genutzt würden³⁰¹. Das bedinge viele Schnittstellen bei Planung, Bau und Betrieb der Gebäude, wobei derzeit auf dem Weg an jeder dieser Schnittstellen ein Wissensverlust stattfinde. Dieser könne nur durch digitalisierte Planungstools, gemeinsame Datengrundlagen und durchgängige Datenformate sowie offene Schnittstellen zwischen den Werkzeugen vermieden werden³⁰². Zusätzlich seien verlässliche Prüfmethode und -verfahren erforderlich³⁰³.

Auch der Nutzereinfluss auf den Energieverbrauch sei eine wichtige Größe beim Gebäudebetrieb. Dieser lasse sich nur schwer prognostizieren und er werde stark von der Nutzerakzeptanz und den speziellen Nutzerbedürfnissen beeinflusst. Auch hier seien passende Tools, aber auch Nutzer- und Betreiberaufklärung notwendig³⁰⁴.

□ Entwicklungsziele

- Erschließung des Flexibilitäts-Potenzials von Gebäuden³⁰⁵
- Steigerung des Wirkungsgrads von Einzeltechnologien im Bereich der effizienten Gebäudetechnik³⁰⁶.
- Weiterentwicklung von (Hochleistungs-)Dämmstoffen sowie Entwicklung von multifunktionalen, aktiven und adaptiven Gebäudehüllen³⁰⁷
- Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit von Baustoffen³⁰⁸
- Management von großen Datenmengen unter Beibehaltung von Datenschutz, Datensicherheit und Handhabbarkeit³⁰⁹
- Konsistente und vereinheitlichte Datenmodelle und Fachdatenbanken als Basis für Planungs-, Simulations- und Nachweisverfahren³¹⁰
- Plug and Play-Lösungen für Energiesysteme und Gebäudetechnik durch offene Standards von Datenschnittstellen und Qualitätssicherungsmaßnahmen³¹¹

³⁰⁰ [H4] (AG3/AG7)

³⁰¹ [H4] (AG3)

³⁰² [H4] (AG5/AG4/AG9)

³⁰³ [H4] (AG5/AG7/AG8)

³⁰⁴ [H4] (AG1/AG3/AG4/AG5/AG6/AG7/AG8/AG9)

³⁰⁵ [C2]; [C4]; [H4] (AG3/AG7)

³⁰⁶ [B2]; [C2]; [E6]; [H4] (AG7); [I1]

³⁰⁷ [C2]; [C4]; [H4] (AG6)

³⁰⁸ [C2]; [C4]; [H4] (AG4)

³⁰⁹ [H4] (AG1/AG2/AG3/AG5/AG7/AG8)

³¹⁰ [C2]; [H4] (AG3/AG5/AG7/AG9)

³¹¹ [H4] (AG3/AG5/AG7)

- Prozessorientierte und durchgängige digitale Werkzeuge und Methoden für Planung, Energiemonitoring, Betriebsdiagnose und -optimierung sowie zur Systemsteuerung von Gebäuden und Anlagen³¹²
- Geschäftsprozesse und -modelle für Energieeffizienztechnologien und Sanierungsmaßnahmen³¹³
- Steigerung von Nutzerakzeptanz und Abbau von Hemmnissen³¹⁴
- Übertragung von Forschungsergebnissen in die Praxis, z. B. für Fachverbände, Ausbildung und Schulungen, und die Normung³¹⁵

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Rahmen des Konsultationsprozesses weisen die Akteure darauf hin, dass der Gebäudesektor einen großen Beitrag zur Energiewende leisten könne. Dabei identifizierten sie viele verschiedene Ansatzpunkte, die für die zukünftige Forschung und Entwicklung notwendig seien. Die folgende Übersicht zeigt die wichtigsten neuen und fortzuführenden Forschungsbereiche.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Standardisierte, offene Schnittstellen für Komponenten bzw. Steuerungsebenen und vereinheitlichtes Datenmodell als Grundlage für verschiedene Planungs-, Simulations- und Nachweisverfahren • Plug und Play-Lösungen für Energiesysteme und die Gebäudetechnik • Entwicklung von durchgängigen, digitalen Planungshilfsmitteln • Verstärkte Anstrengungen im Bereich Datenschutz und Datensicherheit, Übertragung, Verarbeitung und Analyse von großen Datenmengen • Konsistenz/Vereinheitlichung von Daten für Simulationen und Fachdatenbanken • Steigerung der Robustheit und Entwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen • Geschäftsprozesse und -modelle in den Bereichen Energieeffizienztechnologien und -services sowie Sanierungsmaßnahmen • Steigerung der Nutzerakzeptanz und Hemmnisabbau • Übertragung von Forschungsergebnissen in die Praxis (Fachverbände, Ausbildung und Schulungen) und die Normung 	<ul style="list-style-type: none"> • Erschließung des Flexibilitäts-Potenzials von Gebäuden u. a. durch Sektorkopplung • Prozessorientierte Werkzeuge und Methoden für Energiemonitoring, Betriebsdiagnose und -optimierung und Systemsteuerung von Gebäuden und Anlagen • Ressourceneffizienz und Recyclingfähigkeit von Baustoffen • Entwicklung von multifunktionalen, aktiven und adaptiven Gebäudehüllen • Weiterentwicklung von (Hochleistungs-) Dämmstoffen • Steigerung des Wirkungsgrads von Einzeltechnologien im Bereich der effizienten Gebäudetechnik

³¹² [H4] (AG3/AG5/AG7/AG9); [I1]

³¹³ [C4]; [F1]; [H4] (AG7/AG8)

³¹⁴ [H4] (AG1/AG3/AG4/AG5/AG6/AG7/AG8/AG9)

³¹⁵ [H4] (AG3/AG7/AG8/AG9)

Für die Gebäudeenergiesysteme der Zukunft erachten die Akteure in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren eine durchgängige Nutzung von Daten durch ein einheitliches Datensystem als besonders wichtig³¹⁶. Zusätzlich sei eine Offenlegung und Vereinheitlichung von Schnittstellen notwendig, um Daten vom Planungsprozess über den Bau bis hin zum Betrieb und Rückbau sowie für Planungs-, Simulations- und Nachweisverfahren nutzen zu können. Der mit der zunehmenden Digitalisierung einhergehende Anstieg der Datenmengen im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung erfordere neue Lösungsansätze zur Datenaufnahme, -verarbeitung und -auswertung. Dabei seien der Datenschutz und die -sicherheit zu berücksichtigen³¹⁷.

Die Flexibilisierung von Gebäuden wird im Konsultationsprozess als neue, vielversprechende Möglichkeit zur Unterstützung des Stromnetzes gesehen³¹⁸. Hierzu sei ein Zugang zum Strombörsenpreis für Nutzer notwendig³¹⁹. Durch das neue Rollenverständnis von Gebäuden werde es notwendig, die Nutzerakzeptanz und rechtliche Fragestellungen zu untersuchen³²⁰.

Im Rahmen des Konsultationsprozesses erachteten die Akteure es für notwendig, beim neuen Energieforschungsprogramm Einzeltechnologien der effizienten Gebäudetechnik inklusive der Speichertechnik weiterzuentwickeln und deren Wirkungsgrad zu steigern. Das setze die Forschungsaktivitäten des laufenden Energieforschungsprogramms fort³²¹. Für den Nachweis energieeffizienter Technik und Regelungen im Gebäudebereich bestehe weiterhin besonderer Forschungsbedarf im Bereich des Monitorings und der allgemeinen und kostengünstigen Verbreitung dieses methodischen Ansatzes über Forschungsprojekte hinaus³²².

Weiterhin stünde die systematische Integration von Lebenszyklusanalysen in die Neu- und Weiterentwicklung von Baustoffen und Komponenten im Fokus. Dabei seien besonders die Themen Recyclingfähigkeit und Lebensdauer zu adressieren³²³. Hinzu komme die vermehrte Nutzung der gesamten Gebäudehülle zur Erzeugung erneuerbarer Energien³²⁴. Dazu forderten die Akteure die Umsetzung in sogenannten Living Labs und Reallaboren. Diese Maßnahmen seien durch unbürokratische Mini- und Mikroprojekte als adäquate neue Förderinstrumente zu ergänzen³²⁵. Zusätzlicher Forschungsbedarf wird bei der systematischen Erfassung technischer und anderer Hemmnisse gesehen, die aus dem hochkomplexen, von sehr vielen unterschiedlichen Akteuren und Interessen gekennzeichneten Bereich der Gebäude resultieren³²⁶. Dies sei Voraussetzung für spätere Lösungen.

³¹⁶ [C2]; [H4] (AG3/AG5/AG7)

³¹⁷ [H4] (AG1/AG2/AG3/AG5)

³¹⁸ [C2]; [C4]; [H4] (AG3/AG7)

³¹⁹ [C2]

³²⁰ [H4] (AG3/AG7/AG8)

³²¹ [B2]; [C2]; [E6]; [H4] (AG7); [I1]

³²² [H4] (AG3/AG7/AG8)

³²³ [H4] (AG4)

³²⁴ [H4] (AG6)

³²⁵ [H4] (AG8)

³²⁶ [H4] (AG1/AG2/AG6/AG 7)

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Nach Ansicht der Akteure werden aktuell Fortschritte bei der Energieeffizienz im Gebäudebereich verlangsamt, da die regulatorischen Maßnahmen keinen ausreichenden Anreiz schaffen³²⁷. Weitere Entwicklungshemmnisse und Markthürden bestünden in der Individualität der Gebäude und dem Mangel an Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Transparenz³²⁸. Ein zusätzliches Entwicklungshemmnis seien die fehlende Akzeptanz und Anwenderfreundlichkeit sowie die Unsicherheit bei Risiken und Haftungsfragen beim Einsatz neuer Technologien³²⁹.

³²⁷ [H4] (AG7/AG 9)

³²⁸ [H4] (AG5/AG7)

³²⁹ [H4] (AG1/AG7/AG8)

3.10 Energieoptimierte Quartiere

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Im Rahmen des Konsultationsprozesses maßen die Teilnehmer der Onlineumfrage den Effizienzthemen eine hohe Priorität bei. So stehen Forschungsthemen rund um Gebäude und um die energieeffiziente Stadt mit einem zusammengefassten Anteil von 65 % an vierter Stelle der Rangliste. Einen Schwerpunkt bildet dabei die Forschung für dezentrale Energiesysteme sowie für eine Effizienzsteigerung auf Quartiersebene³³⁰. Bei der Wärmewende komme den Quartieren eine besondere Bedeutung zu: Ein Quartier sei einerseits groß genug, um eine Vernetzung der Energieinfrastruktur wirtschaftlich und energetisch sinnvoll umzusetzen. Andererseits sei ein Quartier klein genug, um alle Beteiligte an einen Tisch zu bekommen. Als beispielhafte Quartiere seien Campus-Areale zu nennen, die den besonderen Vorteil böten, nur einen Eigentümer bzw. Betreiber zu haben³³¹.

Im Bereich der energieoptimierten Quartiere benennen die Akteure die Integration von erneuerbarer Wärme als zentralen Punkt. Dabei sei insbesondere die Integration in vorhandene Netze ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. Damit die Energiewende auf Quartiersebene gelingen könne, sei es notwendig, systemisch zu denken und zu handeln. So gelte es, neben der Bestandsaufnahme auch Prognosen zu erstellen und die zukünftige Vernetzung der Wärme- und Strom-Infrastruktur im Auge zu behalten³³². Ferner sei die Kopplung unterschiedlicher Energiequellen mit Speichern und intelligenten Netzen für ein energieeffizientes und netzdienliches Gebäude unerlässlich. Zusätzlich müssten aber auch im Wohnungsbau neue Funktionalitäten integriert werden, die bisher häufig nicht bestünden oder nicht automatisiert seien. Neben den technischen Aspekten seien jedoch auch die Akzeptanz und Bedienbarkeit durch den Nutzer wichtig, wenn zusätzliche Funktionalitäten in ein System integriert würden³³³.

Der Ausgleich von Angebot und Nachfrage könne grundsätzlich durch Flexibilität bei der Erzeugung, bei Speicherung und beim Verbrauch erreicht werden. Ziel von Forschung und Entwicklung müsse es sein, dafür entsprechende Technologien und Systeme zur Verfügung zu stellen³³⁴. Darüber hinaus sei für die flächendeckende Umsetzung von neuen Technologien und Ideen zentral, dass validierte und praxisnahe Tools zur Verfügung stünden. Diese sollten auf zeitlich aufgelösten Modellen basieren und deren Ergebnisse auch für Laien verständlich und zugänglich aufbereitet sein. Neben technischen Entwicklungen für die urbane Energieinfrastruktur sei in den Forschungsprojekten auch eine Betrachtung der verschiedenen Akteursinteressen, des sozio-ökonomischen Umfelds sowie der technischen und regulativen Rahmenbedingungen notwendig³³⁵. Technologieoffenheit wird auch weiterhin als Grundlage von Forschung und Entwicklung gefordert, da derzeit keine Präferenz für eine einzelne Technologie ausgesprochen werden könne. Für die Forschungsförderung und das neue Energieforschungsprogramm habe dies zur Folge, dass die Weiterentwicklung der Flexibilisierungsoptionen der Energieversorgung auch zukünftig zeitlich parallel anzulegen sei. Für eine Umsetzung der Förderprogramme müsse insbesondere bei systemübergreifenden, weit in die Anwendungstechnik hineinreichenden Projekten, eine effektive Projektsteuerung etabliert werden, die im Vorfeld unter stärkerer

³³⁰ [C4]

³³¹ [H4]

³³² [H4]

³³³ [H4]

³³⁴ [C4]

³³⁵ [H4]

Einbeziehung der Industrie zu definieren sei³³⁶. Darüber hinaus fokussiere die deutsche Energiewende derzeit stark auf den Energieträger Strom, d. h., sie wird im hohen Maße als eine „Stromwende“ wahrgenommen. So finde die Kopplung der unterschiedlichen Energiesektoren mit ihren Energieträgern Strom, Wärme, Gas und flüssige Kraftstoffe, sowie den chemischen Grundstoffen in der Technologiediskussion bislang zu wenig Beachtung. Eine Kopplung der Energiesektoren sei aber für ein funktionierendes Energiesystem unverzichtbar, wobei für die Realisierung die deutsche Industrie eine zentrale Zielgruppe sei. Für die Umsetzung der Potenziale der Sektorenkopplung in der Industrie seien Forschung und Entwicklung eine wichtige Voraussetzung³³⁷. Da viele technologische Optionen aber nicht oder nur eingeschränkt im Labormaßstab weiterentwickelt werden könnten, seien daher zur Untersuchung der technischen Machbarkeit und zur Identifikation wichtiger Fragestellungen weitere Demonstrations- und Pilotanlagen erforderlich³³⁸.

Für den Bereich Smart City und Smarte Quartiere erkennen die Akteure einen umfangreichen Anknüpfungsbedarf zur IKT-Forschung. Sie schlagen vor, eine Plattform zum Thema Geschäftsmodelle einzurichten und zu betreiben³³⁹ für das energie- oder gebäudebezogene Energiemanagement mit umfangreichen eigenen Fragestellungen der Quartiersplanung sowie der Querverbundoptimierung zwischen unterschiedlichen Energie- und Versorgungsinfrastrukturen. Dies soll eine Vernetzung der Akteure aus den unterschiedlichen Bereichen ermöglichen. Für „Leuchtturmprojekte“ in bestimmten Regionen könnten Experimentierklauseln, z. B. für Quartiersmodelle, oder auf die besonderen Bedingungen in diesen Regionen zugeschnittene finanzielle und rechtliche Rahmenbedingungen nicht nur nachhaltige Akzente für die Energieforschung setzen, sondern darüber hinaus strukturpolitische Anreize schaffen³⁴⁰.

□ Entwicklungsziele

- Energieeffizienz auf Quartiersebene³⁴¹
- Energiekonzepte für Quartiere mit hohem Anteil erneuerbarer Energien und Abwärme, Flexibilisierung und Systemintegration³⁴²
- Flexibilisierung der Wärmeversorgung und sinnvolle Kopplung mit dem Stromversorgungssystem und der Mobilität im Rahmen einer Sektorenkopplung³⁴³
- Digitalisierung und IKT³⁴⁴
- Wirtschaftlichkeit und Systemkompatibilität der jeweiligen technologischen Lösungen spielen eine wichtige Rolle bei den Entscheidungen der Politik und der Marktakteure³⁴⁵
- Integrale Planung und Umsetzung³⁴⁶
- Partizipation³⁴⁷

³³⁶ [A3]; [C8]

³³⁷ [A3]; [C8]

³³⁸ [C8]

³³⁹ [C7]; [H4]

³⁴⁰ [A4]

³⁴¹ [A1]; [C4]; [H4]

³⁴² [A1]; [A2]; [A3]; [B2]; [C4]; [C6]; [F3]; [G1]; [H4]; [H5]

³⁴³ [B2]; [F3]; [H4]; [H10]

³⁴⁴ [A3]; [B2]; [E6]; [E7]; [H3]; [H4]; [H6]

³⁴⁵ [A3]; [C2]; [C5]; [H4]; [H10]

³⁴⁶ [H4]

³⁴⁷ [A3]

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Den Forschungsbedarf für energetisch optimierte Quartiere schätzten die Akteure entsprechend der Vielfalt der zu betrachtenden Versorgungs-, Gebäude-, Eigentümer- und Nutzerstrukturen als sehr umfassend und heterogen ein. Neben bewährten Förderbereichen, die aus dem laufenden Programm in das neue, 7. Energieforschungsprogramm übernommen werden sollten, finden sich in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren viele neue Ideen und Vorschläge, die in Zukunft gefördert werden sollten.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilisierung der Wärmeversorgung und sinnvolle Kopplung mit dem Stromversorgungssystem und der Mobilität (Sektorenkopplung) • Energiemanagement, Smart Home, Komponentenentwicklung, Netzdienlichkeit • Digitalisierung und IKT, z. B. digitale Geschäftsmodelle wie Mieterstrommodelle und Modelle für Quartierslösungen, Direktvermarktung von Erneuerbaren Energien und Energieautarkiemodelle • Entwicklung vernetzter Datenbankstrukturen, Speicherung umfangreicher Datensätze, Echtzeitanalyse der Daten, Auslegung und modellgestützte Betriebsoptimierung und Regelung • Simulation für die Planung und den Betrieb von Gebäuden und Quartieren mit innovativen Versorgungskonzepten • Weiterentwicklung von Modellen für die Abbildung unterschiedlicher Betrachtungsskalen zur Verbesserung von Analyse- und Optimierungsmethoden, Kopplung zwischen Werkzeugen, Modelle zur Integralen Planung, Erarbeitung und Implementierung eines systemischen Ansatzes • IT-Konzepte zur Vernetzung von Systemkomponenten im Quartier • Innovative Methoden der Modellprädiktive Regelung (MPC) und des Demand Side Management (DSM) • Partizipation und Kommunikation, Aus- und Weiterbildung • Kombination von Living Labs, an denen verschiedene Forschungsfragen in Abfolge oder in Kombination untersucht und Konfigurationen verändert werden können, mit Transferprojekten, in denen gewonnene Erkenntnisse aus den Laborprojekten exemplarisch umgesetzt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieeffizienz auf Quartiersebene • Energiekonzepte für Quartiere mit hohem Anteil erneuerbarer Energien und Abwärme, Flexibilisierung und Systemintegration • Wirtschaftlichkeit und Systemkompatibilität, die auf die Performance der Sanierungsmaßnahmen und Energieeffizienzstandards ausgerichtet ist • Integrale Planung und Umsetzung • Verbesserung der Monitoringkonzepte

Im Bereich der Quartiersbetrachtung seien weitere Aspekte wie Energiemanagement, Smart Home, Komponentenentwicklung, aber auch die Netzdienlichkeit von Gebäuden und das Thema Komplexe Gebäude zu berücksichtigen. Des Weiteren seien neben der Frage von De-/Zentralisierung auch hier Perspektiven für (Vor-) Fertigung und Low-Tech-Konzepte gefragt³⁴⁸.

Sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene werden Forschungsaktivitäten zur Effizienzsteigerung bei der Energiewandlung, der Verteilung und der Senkung der Kosten als notwendig erachtet. Diese sollen das Ziel verfolgen, ein techno-ökonomisches Optimum zu erreichen. Der Energieverteilung über Wärme- oder Stromnetze mit den hierfür erforderlichen Gebäudeanschlussmöglichkeiten (Schnittstellen) komme ebenfalls eine wesentliche Rolle zu. Innovationen seien beispielsweise bei Niedertemperaturnetzen unterhalb Nutzerniveau mit Systemen zur dezentralen Anhebung oder innovativen Hausanschlussstationen mit angegliederten Klein-Pufferspeichern zu erwarten³⁴⁹.

Ferner wird angemahnt, Methoden und Instrumente zur Zusammenführung von Expertenwissen unterschiedlicher Fachdisziplinen für eine gemeinsame Wissensbasis und somit einen optimalen Projektverlauf zu entwickeln³⁵⁰. Hierzu gehörten auch vernetzte Datenbankstrukturen im Rahmen des „Semantic Web“ oder des globalen Erdbeobachtungssystems GEOSS³⁵¹. Dabei solle die Speicherung umfangreicher Datensätze, eine Echtzeitanalyse der Daten („Big Data“) sowie daraus resultierend eine Auslegung und eine modellgestützte Betriebsoptimierung und Regelung möglich sein³⁵². Wünschenswert sei darüber hinaus, ein einheitliches Datenmodell auf Gebäude- und Quartiersebene als gemeinsame Grundlage für Planungs-, Simulations- und Nachweisverfahren verfügbar zu haben³⁵³. Der integrale Planungsprozess ermögliche die zielgerechte Berücksichtigung von Expertenwissen verschiedener Fachdisziplinen und im Ergebnis ein ganzheitlich optimiertes Gebäude, in dem unterschiedliche Anforderungen ausgewogen Beachtung fänden. Ganzheitlich optimierte Planungen seien auch eine Voraussetzung für die notwendige höhere Ressourceneffizienz, ohne die die Klimaschutzziele der Bundesregierung nicht zu erreichen seien³⁵⁴.

Energieoptimierte Gebäude und Quartiere stellten hohe Anforderungen an die Planung, die nur mit Hilfe geeigneter Modellierungen und Tools umzusetzen seien. Grundlegende Fragestellungen seien die Verfügbarkeit einer verlässlichen Datenbasis sowie angepasste Lösungsverfahren und die Kopplung unterschiedlicher Modellierungsansätze für verschiedene Bereiche des Systems Gebäude bzw. Quartier. Diese spielten bei der Entwicklung von Planungswerkzeugen eine ebenso große Rolle wie die Definition standardisierter IKT-Schnittstellen. Planungsprozesse für energieoptimierte Gebäude und Quartiere seien folglich fachbereichsübergreifend durchzuführen. Dabei stehe die Vielzahl fachspezifischer Simulations- und Bewertungstools häufig einer effizienten Planung im Weg. Bisher sei es schwer, das für eine spezifische Fragestellung geeignetste Tool zu finden. Der Begriff „Integrale Planung“ sei in der Praxis nicht eindeutig definiert und auch nicht in der Honorarordnung für Architek-

³⁴⁸ [A1]

³⁴⁹ [H4]

³⁵⁰ [H4]

³⁵¹ [H3]

³⁵² [F3]

³⁵³ [H4]

³⁵⁴ [H4]

ten und Ingenieure (HOAI) verankert. Hier seien eine Begriffsspezifikation sowie die Erstellung geeigneter Planungshilfsmittel notwendig³⁵⁵.

Komplexe planerische und bauliche Fragestellungen im Kontext von Energie und Nachhaltigkeit sind nach Ansicht der Akteure mit traditionellen Planungsansätzen nicht zufriedenstellend lösbar. Ganzheitliche, systemische Betrachtungen, die eine frühzeitige Einbindung und Vernetzung der vielfältigen Fachaspekte erforderten, böten ein erhebliches Optimierungspotenzial. Dabei spiele die Verbindung mit innovativen Informations-/Kommunikationstechnologien eine wichtige Rolle. Die Vielzahl verfügbarer Lösungs- und Optimierungsstrategien erschwere es jedoch, kontextspezifische zielführende Planungsstrategien und Maßnahmen zu identifizieren. Bisher existierten kaum anwendbare systemische Methoden, Vorgehensmodelle oder integrale Planungshilfsmittel, um Planungsteams in den wichtigen frühen strategischen Projektphasen ganzheitlich zu unterstützen. Hieraus ergebe sich ein dringender Handlungsbedarf auf Ebene der Prozessqualität und Akteurskommunikation³⁵⁶.

Die jüngsten Entwicklungen zeigten, dass die Simulation immer wichtiger bzw. teils unausweichlich für die Planung und den Betrieb von Gebäuden und Quartieren mit innovativen Versorgungskonzepten werde. Simulationsergebnisse könnten bereits jetzt in die normativ zugelassenen Verfahren eingekoppelt werden³⁵⁷. Darüber hinaus seien neben Werkzeugen für die Forschung und Planungspraxis didaktisch fokussierte, vereinfachte Werkzeuge zur Aus- und Weiterbildung bedeutsam³⁵⁸. Weitere Vorschläge umfassen die Weiterentwicklung von Modellen für die Abbildung unterschiedlicher Betrachtungsskalen zur Verbesserung von Analyse- und Optimierungsmethoden sowie für die Kopplung von Werkzeugen zur Planung und Betriebsoptimierung. Ergänzend kommen Modelle und Hilfsmittel für die integrale Planung und zur Verlagerung der Einzeltoolentwicklung hin zu einer vernetzt-koordinierten Zusammenarbeit³⁵⁹ hinzu. Als wichtig wird darüber hinaus erachtet, einen systemischen Ansatz zu erarbeiten und zu implementieren³⁶⁰.

Die Akteure konstatieren weiteren Bedarf an Forschung und Entwicklung bei der Verbesserung von Monitoringkonzepten, bei Analysetools, Transparenz- sowie der Qualitätsstandards von Simulationswerkzeugen sowie GLT-integriertem automatischem System-Monitoring bis zur mobilen Monitoring-Toolbox³⁶¹. Hinzu kämen IT-Konzepte zur Vernetzung von Systemkomponenten im Quartier für eine übergeordnete Regelung³⁶², innovative Methoden der modellprädiktiven Regelung (MPC) und des Demand Side Management (DSM)³⁶³ sowie die Entwicklung von Geschäftsmodellen, die auf die Performance der Sanierungsmaßnahmen, wie z. B. Energieeinsparung oder Gebäudekomfort im Lebenszyklus, abgestellt seien. Bisher existierten auf dem Markt nur wenige spezifische Geschäftsmodelle im Bereich der Gebäudeenergieeffizienz³⁶⁴. Um Optionen realistisch bewerten zu können, sei es

³⁵⁵ [H4]

³⁵⁶ [H4]

³⁵⁷ [H4]

³⁵⁸ [H4]

³⁵⁹ [H4]

³⁶⁰ [E7]

³⁶¹ [B2]; [H4]

³⁶² [H4]

³⁶³ [E6]; [H4]

³⁶⁴ [H4]

darüber hinaus wichtig, Bewertungssysteme für das Potenzial möglicher Kostensenkungen durch Skaleneffekte zu entwickeln³⁶⁵.

Elektrische und thermische Quartier- oder Schwarm Speicher seien in der Lage, durch intelligente Verknüpfung der Anbieter und Nutzer und Mehrfachnutzung der Speicherkapazitäten wirtschaftlich interessante Lösungen anzubieten³⁶⁶. Daher sei die Kombination von Modell-/Laborsiedlungsstrukturen, an denen verschiedene Forschungsfragen in Abfolge oder in Kombination untersucht und Konfigurationen verändert werden könnten, mit Transferprojekten eine wünschenswerte Erweiterung heutiger Projektansätze. In diesen sollen gewonnene Erkenntnisse aus den Laborprojekten exemplarisch umgesetzt werden und ein entsprechendes Feedback in Richtung Living Lab zurückspiegeln³⁶⁷.

Das Instrument der Sektorenkopplung sei ein Schlüsselement für das Energiesystem der Zukunft. Es biete für die Ausgestaltung ein hohes gesamtheitliches Potenzial an Flexibilisierungsmöglichkeiten und damit einen unmittelbaren Gewinn an Effizienz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit. Dafür seien die eingesetzten Energiewandlungstechnologien sowie die Infrastrukturen für Speicherung und Verteilung gesamtheitlich und systemisch zu betrachten und zu optimieren. Gemeinsam mit Partnern des Forschungsbereiches Energie der Helmholtz-Gemeinschaft schlagen die Akteure vor, ein „Nationales Forschungskonsortium Sektorenkopplung“ aufzubauen. In diesem Konsortium sollten in den Bereichen Technologieentwicklung, Energiesystemdemonstration, Pilotprojekt „reale Modellstadt“ und der akademischen Ausbildung die Kompetenzen der in der Energieforschung führenden Forschungseinrichtungen und Universitäten sowie deren Partnern aus der Industrie gebündelt werden. Gemeinsames Ziel sei, dezidiert Forschungs- und Entwicklungspfade und Umsetzungsoptionen sowie -strategien für die Sektorenkopplung zu erarbeiten. Der Vorschlag eines Pilotprojekts „reale Modellstadt“ bedeute eine internationale Alleinstellung und verdiene besondere Aufmerksamkeit³⁶⁸.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

In der Praxis bestehe Unklarheit über den Begriff „Integrale Planung“ und dessen Umsetzung. Vor dem Hintergrund der Digitalisierung sei deshalb die Entwicklung eines besseren Verständnisses für planerische Prozesse, der Einbindung aller Beteiligten und der unterschiedlichen, teils neuen Rollen (z. B. BIM-Manager/Projektsteuerer) erforderlich. Dabei bestehe auch ein Kontext zur Honorarordnung für Architekten und Ingenieure³⁶⁹.

Durch energieeffiziente Systeme und innovative Technologien lassen sich erhebliche Energieeinsparungen bzw. Komfortsteigerungen erreichen. In der Anwendung stießen die Konzepte jedoch immer wieder auf mangelnde Akzeptanz bei Nutzern. Dies beruhe einerseits auf persönlichen Technikbiografien, besonders bei älteren Menschen. Andererseits entspreche vielfach das Betriebsverhalten nicht den Wünschen der Nutzer (z. B. Sonnenschutzsteuerungen, Präsenzmelder von Beleuchtungsanlagen), sei die Anwendung grundsätzlich zu kompliziert (z. B. Heizungsvorlauftemperaturregelung, Gebäudeautomation) oder die Erwartungen der Nutzer an die Systeme seien unrealistisch hoch (z. B.

³⁶⁵ [A3]

³⁶⁶ [C5]

³⁶⁷ [H4]

³⁶⁸ [F2]

³⁶⁹ [H4]

mechanische Lüftungsanlagen). Die fehlende Akzeptanz führe in vielen Fällen dazu, dass bestehende Komponenten (z. B. Sensoren) oder komplette Systeme teilweise oder sogar vollständig außer Betrieb genommen würden bzw. vielversprechende Innovationen keine Verbreitung am Markt erlangten³⁷⁰.

Neben politischen und institutionellen Hindernissen stehe das Erreichen der energiepolitischen Ziele auch vor der Schwierigkeit, dass Technologien und Systeme noch nicht verfügbar oder nicht wirtschaftlich seien³⁷¹.

³⁷⁰ [H4]
³⁷¹ [C4]

3.11 Wärmetransport, -verteilung und –speicherung

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Da sich Energieverbrauch und Bevölkerung in Deutschland immer mehr in Ballungsräumen konzentrierten, sei eine wachsende Bedeutung von Wärmenetzen und Quartiersbetrachtungen für eine erfolgreiche Energiewende absehbar³⁷². Darüber hinaus sei das immense Energiepotenzial regenerativer Wärmeträger, z. B. Solarthermie, Geothermie, Biomasse, Umwelt- und Abwärme, weitgehend unerschlossen. Diese können Niedertemperatur-Wärme mit einer Temperatur von bis zu 100 °C liefern, die sich für die Bereitstellung von Raum- und Prozesswärme eigne³⁷³. Folglich solle die primäre Wärmeversorgung zukünftig aus erneuerbaren Quellen stammen (z. B. Solarenergie, Umgebungswärme, Abwärme). Für die verbleibenden Versorgungslücken könne sich Wärme aus Biomasse aufgrund ihrer Speicherfähigkeit als ökonomisch vorteilhaft erweisen. So könne ein intelligenter Einsatz der speicher- und lagerfähigen Biomasse in Kombination mit zumindest zeitweise sehr kostengünstigen erneuerbaren Energiequellen zu volks- und einzelwirtschaftlich vorteilhaften Lösungen beitragen³⁷⁴.

Ergänzend dazu dienten tiefegeothermische Anlagen der Bereitstellung von Wärme und – bei entsprechenden geophysikalischen Voraussetzungen – der Erzeugung von Strom. Neben der direkten lokalen Nutzung des Thermalwassers stelle die Belieferung von Fernwärmenetzen in derzeit 23 Anlagen in Deutschland heute die vorrangige Nutzung tiefer geothermischer Reservoirs dar. Dabei werde zukünftig die Wärmeversorgung in Ballungsgebieten und auch in Quartieren von zentraler Bedeutung sein („Wärmewende“)³⁷⁵. Erweiterungspotenziale der oberflächennahen Geothermie bestünden bei der Wärmeversorgung von Mehrgeschossbauten, insbesondere im Bestand, bei geothermischen Komponenten für Nahwärmenetze sowie bei der Schaffung neuer Anwendungen, wie z. B. Weichenheizungen³⁷⁶.

Flexibilisierungsmöglichkeiten im Haushaltssektor ergeben sich den Expertenempfehlungen und Positionspapieren zufolge insbesondere durch Wärme-Strom-Kopplung u. a. mit Wärmepumpen und BHKWs, während für die Erschließung von Flexibilitätspotenzialen auf der Verbrauchsseite (Demand-Side-Management) vor allem wirtschaftliche Anreize von Bedeutung seien³⁷⁷. Aber auch andere Technologien, die Flexibilität im System bereitstellen können, seien stärker weiterzuentwickeln. So sei die Zusammenführung der Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Mobilität zu intensivieren, wobei vor allem die erneuerbaren Energien stärkeren Einzug in die Verbrauchssektoren Wärme/Kälte und Mobilität erhalten müssten³⁷⁸. Zudem solle die Verknüpfung mit den Sektoren Industrie und Landwirtschaft verstärkt in den Fokus rücken³⁷⁹. Hierzu sei ein besseres Verständnis der Gesamtprozesse erforderlich, da auf Anlagenebene Effizienzsteigerungen nur noch schwer bzw. nur durch einen hohen Technologiesprung zu erzielen seien. Die Komplexität der Prozesse nehme stetig zu und dies erfordere eine interdisziplinäre Forschung zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende. Beson-

³⁷² [H1]

³⁷³ [G1]; [H4]

³⁷⁴ [H1]

³⁷⁵ [C6]

³⁷⁶ [C6]; [G1]

³⁷⁷ [C4]; [H1]

³⁷⁸ [A5]; [F3]

³⁷⁹ [E7]

ders der Ausbau der IKT-Infrastruktur und die Standardisierung bildeten dabei wesentliche Bausteine. Diese gelte es, in Simulationen und in Demonstrationsvorhaben zu erproben. So biete z. B. die Metropolregion Hamburg als „Reallabor für die Energiewende“ ideale Voraussetzungen, derartige Vorhaben umzusetzen und neue Lösungsmöglichkeiten anzuwenden³⁸⁰.

Vor dem Hintergrund heterogener Siedlungsstrukturen, z. B. hochverdichtet, Großwohnsiedlung, suburban und ländlich, sowie den unterschiedlichen Anforderungen von Bestandsgebäuden und Neubauten an die Wärmeversorgung, bestünden darüber hinaus Herausforderungen bei der Weiterentwicklung, dem Umbau und dem Neubau leitungsgebundener Wärmeverteilssysteme. Hier stellten sich insbesondere Fragen im Hinblick auf die Kopplung von neuen mit bestehenden Wärmenetzen auf gegebenenfalls unterschiedlichen Temperaturniveaus und auf den Betrieb von Niedertemperaturnetzen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien. Dies betreffe auch die Versorgung von Bestandsgebäuden, die Flexibilisierung der Wärmeversorgung und die sinnvolle Kopplung mit dem Stromversorgungssystem³⁸¹.

Besonderes Augenmerk solle die Energieforschungspolitik den möglichen „Game Chängern“ widmen, die derzeit als eine Entwicklungstendenz bereits zu erkennen sind. Deren Bedeutung werde jedoch kontrovers diskutiert. Beispiele für potenziell disruptive Technologien seien der stark wachsende Bereich der Hausspeicher aufgrund von Skaleneffekten sowie Digitalisierungs-Innovationen, die in Verbindung mit dem Internet der Dinge neue Marktakteure auf den Plan riefen³⁸².

□ Entwicklungsziele

- Innovative Konzepte zur Integration industrieller Abwärme in (Fern-)Wärmenetze
- Effizienzsteigerung von (Fern-)Wärmenetzen³⁸³
- Entwicklung intelligenter Wärmeübergabestationen zur Temperatursteuerung des Wärmenetzes (bidirektionale Konzepte)³⁸⁴
- Weiterentwicklung der Energieversorgung bei vorhandenen Infrastrukturen mit dem Ziel netzdienliche Quartiere³⁸⁵
- Optimierte Speicherlösungen für flexibilisierte und in ihrer Effizienz verbesserte Prozesse in Industrie, Kraftwerken, Wärmenetzen und für die Nutzung an der Strom-Wärme-Sektorgrenze³⁸⁶
- Verbesserung der Prognosen von Wärmelasten³⁸⁷
- Kälte³⁸⁸
- Digitalisierung³⁸⁹
- Demonstration in Reallaboren und Pilotregionen mit Ausnahmeregelungen bzw. Experimentierklauseln³⁹⁰

³⁸⁰ [B2]; [F1]; [H1]

³⁸¹ [B2]

³⁸² [F1]

³⁸³ [B2]; [H4]; [H8]

³⁸⁴ [B2]

³⁸⁵ [B2]; [H8]

³⁸⁶ [H8]

³⁸⁷ [B2]

³⁸⁸ [A1]; [E6]; [H4]

³⁸⁹ [E6]; [F1]; [F3]; [H1]

- System- und Marktintegration, Wirtschaftlichkeit³⁹¹
- Entwicklung von Betriebsanalysen/-modellen von Niedertemperatur-Wärmenetzen und Aussagen über Ihre Nutzungsdauer³⁹²
- Systemdienstleistung des Wärmenetzes für das Stromnetz einschließlich der entsprechenden Optimierungsansätze³⁹³
- Verbesserung der Monitoringkonzepte und Analysetools, um Netzfehler zu identifizieren³⁹⁴; Entwicklung und Verbesserung von Planungs- und Auslegungswerkzeugen³⁹⁵
- Umgang mit großen Datenmengen aus der Wärmenetzinfrastruktur³⁹⁶
- Entwicklung von Verfahren zur Akzeptanzerhöhung von neuen Wärmeverteilungs- bzw. Wärmeversorgungskonzepten³⁹⁷

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die zur netzgebundenen Wärmeversorgung vorgelegten Expertenempfehlungen und Positionspapieren umfassen – wie bei den anderen Forschungsbereichen auch – viele bewährte Förderthemen, die nach Ansicht der Akteure fortgeführt werden sollten. Darüber hinaus werden vielfältige neue Forschungsfelder benannt, die in das neue, 7. Energieforschungsprogramm aufgenommen werden sollten. Beide Forschungsbereiche sind in der folgenden Übersicht zusammenfassend dargestellt.

Im Bereich der Wärmeversorgung bestehe insbesondere bei intelligenten und energieeffizienten Quartieren sowie deren Einbettung in bestehende Siedlungsstrukturen Forschungsbedarf. Zudem solle die Energieversorgung bei vorhandenen Infrastrukturen mit dem Ziel weiterentwickelt werden, netzdienliche Quartiere zu schaffen. Weiterhin seien innovative Power-to-Heat-Konzepte notwendig, die an die Sektorenkopplung anknüpfen und der optimierten Integration von erneuerbaren Energien in den Wärmesektor dienen³⁹⁸.

³⁹⁰ [A1]; [A4]; [F1]; [H4]; [H8]

³⁹¹ [A1]; [A5]; [B2]; [E6]; [H1]; [H4]; [H8]

³⁹² [B2]; [H1]

³⁹³ [B2]; [E6]; [H4]

³⁹⁴ [B2]; [F1]; [H1]

³⁹⁵ [H1]; [H4]

³⁹⁶ [B2]; [H4]

³⁹⁷ [B2]; [H1]

³⁹⁸ [B2]; [C6]; [E6]; [H1]

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Prognosen von Wärmelasten • Kälte • Digitalisierung • Demonstration in Reallaboren und Pilotregionen mit Ausnahmeregelungen bzw. Experimentierklauseln • System- und Marktintegration, Wirtschaftlichkeit • Entwicklung von Betriebsanalysen und -modellen von Niedertemperatur-Wärmenetzen und Aussagen über Ihre Nutzungsdauer • Systemdienstleistung des Wärmenetzes für das Stromnetz einschließlich der entsprechenden Optimierungsansätze • Verbesserung der Monitoringkonzepte und Analysetools um Netzfehler zu identifizieren • Entwicklung und Verbesserung von Planungs- und Auslegungswerkzeugen • Umgang mit massiven Datenmengen aus der Wärmenetzinfrastruktur • Entwicklung von Verfahren zur Akzeptanzsteigerung von neuen Wärmeverteilungs- bzw. Wärmeversorgungsansätzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Innovative Konzepte zur Integration industrieller Abwärme in (Fern-) Wärmenetze • Effizienzsteigerung von (Fern-) Wärmenetzen • Entwicklung (intelligenter) Wärmeübergabestationen zur Temperatursteuerung des Wärmenetzes (bi-direktionale Konzepte) • Weiterentwicklung der Energieversorgung bei vorhandenen Infrastrukturen mit dem Ziel netzdienliche Quartiere • Optimierte Speicherlösungen für flexibilisierte und Effizienz verbesserte Prozesse in Industrie, Kraftwerken, Wärmenetzen und für die Nutzung an der Strom-Wärme-Sektorgrenze • Stationäre Speichertechnologien speziell für kostengünstige lange und sehr lange Speicherdauern

Beginnend in den Regionen mit dem höchsten Sanierungsbedarf seien flächendeckende Wärmebereitstellungs- und Wärmeverbrauchskataster inklusive möglicher geplanter oder absehbarer Änderungen zu erstellen. Damit werde eine gezielte Quartiersüberplanung überhaupt erst möglich. Hierfür seien geeignete, möglichst automatisierte Verfahren und Methoden zu erforschen und zu entwickeln, um ein kontinuierliches Monitoring zu etablieren. Dies erfordere Verfahren und Methoden, mit denen die unterschiedlichen Quartiere und Gebiete Deutschlands im Hinblick auf ihren Handlungsdruck, z. B. Alter der Heizanlagen und Gebäude, die Handlungsmöglichkeiten, die Zahlungsbereitschaft und technische Optionen, analysiert und Empfehlungen ausgesprochen werden könnten³⁹⁹.

Weiterer Bedarf an Forschung und Entwicklung bestehe bei automatisierten Lösungshilfen zur Unterteilung von bestehenden Fernwärmenetzen in Quartiersnetze. Diese sollten wasserseitig über eine physikalische Trennung mittels Wärmetauscher verfügen, um in den Quartieren eigene Temperaturbereiche und eigene Leitungsoptimierungsoptionen ausschöpfen zu können, z. B. durch Dreileiter-

³⁹⁹ [H1]

Systeme, „Kalte“ Netze oder Flexible Netze⁴⁰⁰. Zusätzlich seien technische Hilfsmittel zur Überplanung von Quartieren mit vorhandenen Netzen und einer bestehenden Heißwasserversorgung erforderlich. Diese sollten eine Integration aller möglichen erneuerbaren Wärmeoptionen verschiedenster Größen berücksichtigen. Dabei sollten insbesondere die Möglichkeiten leistungsmäßig angepasster Biomasse-Wärme-Kraftanlagen im Mittelpunkt stehen, die die Wärmeversorgungssicherheit gewährleisten und Stromschwankungen innerhalb des Quartiers abfedern könnten⁴⁰¹.

Den Akteuren zufolge erfordert das Design, der Aufbau und die Optimierung des Energiesystems mit seinen Komponenten, speziell in seiner Veränderung hin zu dezentral organisierten und zeitlich variablen Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen sowie teilweise vielfachen Umwandlungs- und Speicherschritten, ein grundlegendes Verständnis der dynamischen und systemtechnischen Zusammenhänge aller Komponenten. Dazu gehören auch die das Gesamtsystem beschreibenden Prozess- und Steuerungsvariablen. In diesem Zusammenhang bedürfe es der Entwicklung von Teilmodellen für die einzelnen Komponenten, z. B. Erzeuger, Verbraucher, Verteil- und Übertragungselemente, Energiewandler, Speicher, sowie von Verbindungselementen im Gesamtsystem wie Wärme- und Kältenetze, Strom- und Gasnetze⁴⁰².

Im Bereich der stationären Speichertechnologien bestehe speziell für kostengünstige lange und sehr lange Speicherdauern weiterer Forschungsbedarf⁴⁰³. Beispiele seien Verschiebespeicher, saisonale Speicher, z. B. Redox-Flow-Batterie, adiabatische Druckluftspeicher, Power-to-X und Latentwärmespeicher. Bei der Wärmespeicherung im oberflächennahen Untergrund seien eine verbesserte Erkundung geeigneter Standorte im urbanen Untergrund, Untersuchungen zu möglichen temperaturabhängigen mikrobiellen und chemischen Veränderungen sowie Konzepte zum Monitoring von Wärme und Fluidveränderungen erforderlich⁴⁰⁴. Ein weiterer Untersuchungsansatz betreffe die Einbindung der Geothermie in Niedertemperaturnetze und deren Potenzial zur Wärme- und Kältespeicherung⁴⁰⁵ sowie der Einsatz von CO₂ als Wärmeträgermedium in Erdwärmesonden und geothermischen Anwendungen⁴⁰⁶.

Die Forschungsförderung solle sich nicht auf das Gesamtsystem beschränken, sondern auch Einzelkomponenten erforschen und weiterentwickeln. Dennoch brauche es eine ganzheitliche Erforschung neuer Geschäftsmodelle in Pilotregionen, in denen sich technische, ökonomische und rechtliche Forschungsperspektiven verbinden ließen. Insbesondere die Einführung von Pilotregionen für Netze und Technologien (Gas, Strom, Wärme, Verkehr, Daten/Digitalisierung) seien im Sinne von „Reallaboren“ nützliche Instrumente einer Forschungsförderung⁴⁰⁷.

⁴⁰⁰ [H1]

⁴⁰¹ [H1]

⁴⁰² [F3]; [H1]

⁴⁰³ [E6]; [H1]

⁴⁰⁴ [E6]; [G1]

⁴⁰⁵ [C6]

⁴⁰⁶ [H8]

⁴⁰⁷ [A4]; [E6]; [H4]

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden sehen die Akteure insbesondere, wenn unterschiedliche Anlagen die gleiche Wärmenachfrage abdecken sollen. Dies führe zu steigenden Investitionskosten, sodass die Gesamtlösung nur schwerlich kostengünstig realisierbar sei⁴⁰⁸. Zur Überwindung technikspezifischer Entwicklungshemmnisse und Markthürden schlagen sie vor, künftig auch Aktivitäten zur Projektkoordinierung und -vernetzung zu fördern⁴⁰⁹.

⁴⁰⁸ [H1]

⁴⁰⁹ [A4]

3.12 Niedertemperatur-Solarthermie

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Das zukünftige dekarbonisierte Energiesystem ist nach Einschätzung der Akteure in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren durch die drei Pfeiler Energieeinsparung, Energieeffizienz und erneuerbare Energien gekennzeichnet. Obwohl mehr als die Hälfte der heute genutzten Endenergie als Wärme benötigt werde, fokussiere sich die politische Diskussion weiterhin auf den Strommarkt.

Gerade im Wärmebereich sei der Beitrag erneuerbarer Energien (unverändert) gering und die Wärmebereitstellung werde durch fossile Energieträger dominiert. Aber die Wärmewende mit einem deutlich höheren Anteil erneuerbarer Energien, insbesondere Solarthermie und Geothermie, rücke zunehmend in den Mittelpunkt. Dabei werde die Rolle – über Sektorenkopplung – strombasierter und direkter regenerativer Wärmeerzeugung differenziert gesehen⁴¹⁰.

□ Entwicklungsziele

- (Weiter-) Entwicklung effizienter Komponenten und Anlagen
- (Weiter-) Entwicklung effizienter Systemkonzepte für CO₂-neutrale bzw. weitgehend erneuerbare Versorgung mit Wärme (und Strom)
- Flexibilisierung der Wärmeversorgung und sinnvolle Kopplung mit dem Stromversorgungssystem
- Erreichung einer nachhaltigen Kostensenkung

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der konkrete Bedarf an Forschung und Entwicklung für die Niedertemperatur-Solarthermie wird insbesondere in den Expertenempfehlungen des Forschungsnetzwerkes ENERGIEWENDEBAUEN sehr detailliert beschrieben. Neben dem Netzwerk als Ganzes ist hier besonders die AG 10 zu nennen, in der die Experten in diesem Technologiefeld organisiert sind⁴¹¹. Diese Einschätzung deckt sich im Grundsatz mit weiteren Expertenempfehlungen und Positionspapieren⁴¹² sowie der Onlineumfrage, die im Rahmen des Konsultationsprozesses durchgeführt wurde⁴¹³. Die folgende Tabelle zeigt eine vergleichende Übersicht der Themenschwerpunkte, die aus Sicht der Akteure neu ins Energieforschungsprogramm aufgenommen sowie Förderbereiche, die auf der Basis des laufenden Programms weitergeführt und aktualisiert werden sollten.

⁴¹⁰ [A1]; [B2]; [C2]; [C4]; [E6]; [F1]; [F2]; [F3]; [H1]

⁴¹¹ [H4]

⁴¹² [C6]; [E6]; [H5]

⁴¹³ [I1]

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Ergänzende Betrachtung sozioökonomischer Fragestellungen einschließlich Akzeptanzfragen • Geschäftsmodellentwicklungen, neue Vermarktungsstrategien, Verfahren Wirtschaftlichkeitsberechnung und Primärenergiebewertung • Fokus auf optimale Systemintegration / Entwicklung von Lösungen zur optimierten Einbindung in konventionelle und regenerative Wärme- und Energieversorgungssysteme zur Steigerung der Gesamteffizienz und Minimierung der CO₂-Emissionen von Gebäude- bis zur Quartiersebene als auch von Industrieprozessen 	<ul style="list-style-type: none"> • Einbindung von Solarthermieanlagen in Erzeugerstrukturen der Fern- und Nahwärme für eine netzgebundene CO₂-neutrale Wärmeversorgung von Quartieren, Städten und für Siedlungen im ländlichen Raum • Solare Prozesswärme • Senkung Gestehungskosten für solare Wärme (effiziente systemtechnische Lösungen, konsequente Weiterentwicklung von Komponenten wie Kollektor und Speicher, Installation und Betrieb) • Neue Konzepte für gelungene Gebäudeintegration von energieerzeugenden Fassaden • Solare Kühlung / Kälteerzeugung

Hoher Forschungsbedarf und gleichzeitiges hohes Marktpotenzial für das Technologiefeld Niedertemperatur-Solarthermie bestehe insbesondere in den Bereichen Solarisierung von Wärmenetzen, z. B. Niedertemperatur-Wärmenetze, Smart Heat Grids, Micro-Grids, Einspeisung erneuerbarer (Ab)Wärme, und solare Prozesswärme⁴¹⁴. Übereinstimmend werden in vielen Expertenempfehlungen und Positionspapieren folgende weitere Forschungsfelder – mit teils unterschiedlicher Gewichtung – genannt⁴¹⁵:

- Fortlaufende systemorientierte Weiterentwicklung von Kollektoren einschließlich der Entwicklungslinie Hybridkollektoren (PVT-Kollektor)
- Fortlaufende Weiterentwicklung effizienter thermischer Speicher einschließlich saisonale und multifunktionale Wärmespeicher (Material- als auch Systemforschung)
- Neue Konzepte für Gebäudeintegration/multifunktionale Solarfassaden (gebäudeintegrierte Solarthermie (BIST) und (BIPV))
- Optimale Systemintegration/Entwicklung von Lösungen zur optimierten Einbindung in konventionelle und regenerative Wärme- und Energieversorgungssysteme zur Steigerung der Gesamteffizienz und Minimierung der CO₂-Emissionen von der Gebäude- bis zur Quartiersebene
- Weiterentwicklung effizienter, standardisierter, fehlerfreier und kostengünstiger Systemtechnik (Modularisierung, Vereinfachung der Montage („plug and function“))
- Innovative Kombianlagen mit hohen solarthermischen Deckungsanteilen
- Solare Kühlung/Kälteerzeugung mit neuartigen und wettbewerbsfähigen Systemansätzen

⁴¹⁴ [E6]; [H4]; [I1]

⁴¹⁵ [A1]; [C4]; [C5]; [G1]; [H4]; [I1]

- Entwicklung von Verfahren zur Kontrolle von Ertrag und Funktion, zur Prognose sowie zur Erkennung / Meldung von Anlagenfehlern und Betriebsoptimierung

Die Akteure messen der Betrachtung sozio-ökonomischer Fragestellungen bis hin zu Nutzerakzeptanzfragen neben der Betrachtung der klassischen technologiebasierten Forschungsfragen neuerdings mehr Bedeutung bei⁴¹⁶. Sie sehen stärker als in der Vergangenheit die Wichtigkeit von fächer-/sektorübergreifenden und interdisziplinären Forschungsvorhaben. Darüber hinaus sei ein verstärkter Fokus auf Systemstudien und systemanalytische Forschungsarbeiten zu legen⁴¹⁷.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Trotz nachweislich erreichter Lernkurven bei der Solarthermie ist nach Einschätzung der Akteure die Kostensenkung, u. a. durch weitreichende systemische Ansätze, entscheidend für die weitere Marktentwicklung⁴¹⁸. Im Bereich Niedertemperatur-Solarthermie sei bereits ein hoher Technologiereifegrad erreicht worden. Dies gelte insbesondere für kleinere Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung in Ein- und Zweifamilienhäusern, die nach wie vor mehr als 90 % des derzeitigen Marktvolumens ausmachten. Der Einsatz in Mehrfamilienhäusern, die solare Prozesswärme sowie insbesondere die Solarisierung von Wärmenetzen seien künftige Wachstumsfelder⁴¹⁹.

Die deutschen Hersteller seien führend im internationalen Vergleich, allerdings habe die Branche in Deutschland Jahre mit einer starken Marktkonsolidierung hinter sich. Die weitere Marktentwicklung im Bereich Niedertemperatur-Solarthermie stehe in wachsender Konkurrenz zu anderen Technikoptionen, insbesondere dem Heizen mit Photovoltaik (PV) und Wärmepumpe. Gerade im Neubau sinke durch energieeffizientes Bauen und gesetzlicher Rahmenbedingungen (z. B. EnEV) der Heizenergiebedarf weiter und der PV-Eigenstromverbrauch zur Netzentlastung stehe im Mittelpunkt und werde gefördert. Das große Potenzial der Niedertemperatur-Solarthermie sei bislang nur in einem geringen Umfang erschlossen.

⁴¹⁶ [H4]; [I1]

⁴¹⁷ [I1]

⁴¹⁸ [H4]

⁴¹⁹ [I1]

3.13 Bioenergie

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Die größte Herausforderung eines Energiesystems mit hohem Anteil an Wind- und Solarenergie bestehe darin, die wetterbedingten und saisonalen Schwankungen des Dargebots durch Dynamisierung und Flexibilisierung im Gleichgewicht mit der Nachfrage zu halten, so die Akteure in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren. Über alle Sektoren betrachtet liefert Bioenergie aktuell den größten Anteil an erneuerbarer Energie⁴²⁰. In einem Energiesystem mit einem hohen Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien müsse Bioenergie zukünftig wegen ihrer Flexibilität in allen Sektoren und beim Aufbau der Sektorkopplung bedarfsgerecht integriert werden⁴²¹.

Zusätzlich gewinne die gekoppelte stoffliche und energetische Nutzung an Relevanz. Um die Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele sowie die Transformation der Rohstoffbasis für die Wirtschaft zu erreichen, sei die Bioökonomie eine tragende Säule. Mit biobasierten Technologien, Prozessen und Erkenntnissen sollten biogene Ressourcen effizient und nachhaltig genutzt und innovative Produkte entwickelt werden. Damit reduziere sich der CO₂-Ausstoß, Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen in der Chemie-, Lebensmittel-, Textil-, Papier-, Zellstoff-, Pharma-, Agrar-, Kosmetik- sowie in der Umwelt- und Energiewirtschaft⁴²².

Die begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse in Deutschland erfordere zukünftig deren Einsatz dort, wo sie die größte Wertschöpfung erziele und wo andere Substitutionsmöglichkeiten fossiler Energieträger fehlten. Beispiele seien Schwerlastverkehr, Schifffahrt, Luftfahrt, Baumaschinen, Hochtemperaturanwendungen, Produktsynthesen in der Industrie und die bedarfsgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme. Die Energiebereitstellung auf Basis biogener Rückstände, Nebenprodukte und Abfälle verfüge über ein großes Potenzial⁴²³.

Zukünftige Herausforderungen für die Bioenergie lägen somit übergreifend in einer fortschreitenden Flexibilisierung und Systemintegration bei gleichzeitiger Kostensenkung und Effizienzsteigerung.

□ Entwicklungsziele

Um einen nachhaltigen Beitrag zur Energiewende in allen Sektoren zu leisten, seien kurz- und mittelfristig folgende Ziele und Maßnahmen notwendig:

- Effizienzsteigerungen der Konversion (Energie und Kosten)
- Reduzierung der Umweltwirkungen, u. a. durch kostengünstige Minderungsmaßnahmen für die lokalen Emissionen
- Höhere Inputflexibilität zur Verwertung heterogener Reststoff- und Abfallstoffe
- Bedarfsgerechte und flexible systemdienliche Energiebereitstellung
- Integration der Bioenergie in innovative KWK-Konzepte mit hohen Gesamtnutzungsgraden und Sektorkopplung
- Nachhaltige und wettbewerbsfähige Bioraffinerien mit diversen marktkompatiblen Produkten (z. B. Kraftstoffe, Chemikalien, Grundstoffe, Futtermittel)

⁴²⁰ [F1]

⁴²¹ [B2]; [E6]; [F3]; [H1]

⁴²² [A3]; [B2]; [C1]; [E6]

⁴²³ [A1]; [A3]; [B2]; [C4]; [H1]

Darüber hinaus gelte es, die Exportstärke und Technologieführerschaft deutscher Unternehmen und Hersteller für Bioenergieanlagen in Europa und weltweit zu sichern⁴²⁴. Für eine konkurrenzfähige Bioenergiebranche in Europa und weltweit sei es deshalb notwendig, Potenziale zur Kostensenkung entlang der gesamten Wertschöpfungskette noch stärker zu heben.

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Insgesamt sehen die Akteure neue Aufgaben für die Bioenergieforschung in den Sektoren Strom, Wärme/Kälte und Verkehr sowie in der systemübergreifenden Kombination mit anderen erneuerbaren Energien, aber auch in der stofflichen Nutzung von Biomasse. Es müssten sowohl saubere, leistungsfähige und effiziente Bioenergietechnologien weiterentwickelt als auch Synergien im smarten Zusammenspiel mit anderen fluktuierenden und speicherbaren Energien verknüpft werden, beispielsweise mittels Hybrid- und Multibridsystemen⁴²⁵. In geringerem Umfang wird die Fortsetzung von Programmschwerpunkten aus dem bisherigen Programm zur energetischen Biomassenutzung empfohlen, wie die folgende Übersicht zeigt.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms bzw. des BMWi-Programms Energetische Biomassenutzung, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Systemintegration der Bioenergie im Zusammenspiel mit anderen erneuerbaren Energien und der Sektorenkopplung im Gesamtsystem • Bioenergie und Integration im Verkehr • Gekoppelte stoffliche und energetische Nutzung von Biomasse (Bioökonomie) • Weiterentwicklung und Anwendung geeigneter Methoden, z. B. System- und Nachhaltigkeitsanalysen, Life Cycle Assessments (LCA), sektorgekoppelte Energiesystemmodelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Bioenergie im Wärmemarkt • Bioenergie im Strommarkt

Als Ergebnis des Konsultationsprozesses zeichne sich dringender Bedarf an Forschung und Entwicklung bei dem Themen Systemintegration der Bioenergie im Zusammenspiel mit anderen erneuerbaren Energien und der Sektorenkopplung im Gesamtsystem (Bioenergie als Systemintegrator) ab. Die Akteure fordern, neben der Optimierung von Einzeltechnologien auch Gesamtlösungen zur systemischen Kopplung der Sektoren Strom, Wärme/Kälte, chemische und technische Grundstoffe sowie Mobilität zu erarbeiten. Dabei seien sowohl stationäre als auch mobile Anwendungen, mit fluktuierenden und auch mit speicherbaren erneuerbaren Energieträgern, sowie die intelligente Regelung, Steuerung und Automatisierung wichtige neue Elemente. Die Akteure empfehlen themenübergreifend, die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu Sektorenkopplung, System- und Marktintegra-

⁴²⁴ [A1]

⁴²⁵ [B2]; [F3]; [H1]

tion und Cross-Energy-Management in allen räumlichen Ebenen und Größenskalen zu stärken und zu fokussieren⁴²⁶. Sie sprechen sich für folgende künftige Forschungsfelder mit einer Fülle von Einzelaspekten aus:

- Innovative und integrierte Versorgungskonzepte und dazu passende Systemregler
- Hybrid- und Multibridsysteme
- Dezentrale kombinierte Strom-/Wärme-Speichersysteme einschließlich netzdienlicher Systemintegration
- Entwicklung und Ausbau von Konzepten für die Sektorenkopplung
- Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik entlang der Verarbeitungskette, Blockchain Ansätze für den Handel

Zusätzlicher Bedarf an Forschung und Entwicklung existiere im Themenbereich Bioenergie und Integration im Verkehr, insbesondere für flüssige und gasförmige erneuerbare Kraftstoffe. Der Einsatz von nachhaltigen Biokraftstoffen habe in der Verkehrswende, die auf mehr Umwelt- und Klimaschutz im Verkehr ziele und anstrebe, die Schwefel- und Stickstoffoxid-Emissionen zu senken, insbesondere eine kurz- und mittelfristige Bedeutung. Anschließend solle die Elektromobilität flächendeckend den Verbrauch flüssiger Kraftstoffe in Straßenverkehr, Schifffahrt und Luftverkehr substituieren. Für die bereits etablierten Produktionsverfahren flüssiger und gasförmiger Biokraftstoffe, beispielsweise Bioethanol, Biodiesel, HVO/HEFA und Biomethan, sei es notwendig, die Bandbreite an biogenen Einsatzstoffen inklusive der Rest- und Abfallstoffe zu vergrößern⁴²⁷. Folgende Forschungsfelder bestehen nach Ansicht der Akteure:

- Effiziente Bereitstellung von biomassebasierten neuartigen Kraftstoffen und Erschließung zusätzlicher Biomassepotenziale (z. B. Produktionsreststoffe)
- Anlagenkonzeptionierungen und -skalierung, Kraft-/Brennstoffe im MW-Maßstab
- Optimierung bestehender Produktionsanlagen (Effizienzsteigerungen)
- Stärkung von Synergien zwischen der Biokraftstoffproduktion mit der stofflichen Biomassenutzung (Bioraffinerien), der Lebens- und Futtermittelproduktion sowie der Stromproduktion (Sektorkopplung, z. B. über Verbindung von biogenem CO₂ mit Power-to-X)
- Identifizierung vordringlicher Einsatzbereiche der flüssigen und gasförmigen Biokraftstoffe in spezifischen Verkehrssektoren bei Sicherung der Kraftstoffqualität und Kompatibilität mit Antriebssystemen bis hin zur Vertriebsinfrastruktur

⁴²⁶ [B2]; [E6]; [F3]; [F1]; [H1]

⁴²⁷ [A1]; [A3]; [B2]; [C4]; [E6]; [F3]; [H1] (AG3)

Ein weiteres neues Thema im Vergleich zum laufenden Energieforschungsprogramm sei die gekoppelte stoffliche und energetische Nutzung (Bioökonomie). Diese habe eine nachhaltige und effiziente Bereitstellung biobasierter Produkte mittels innovativer Technologien zum Ziel. Dadurch solle auch der CO₂-Ausstoß, der Ressourcenverbrauch sowie das Abfallaufkommen reduziert werden. Beispiele seien Biokraftstoffe mit Bio-Ethanol aus Agrarreststoffen und bio-basierte Chemikalien und Materialien. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat bereits umfangreiche Forschungen zur Bioökonomie gefördert. Zusätzlich empfehlen die Akteure eine staatliche Unterstützung von Investitionen, um Referenzanlagen im industriellen Maßstab zu realisieren, um das Risiko beim „Scale-up“ von Anlagen zwecks Markteinführung zu minimieren⁴²⁸. Von Seiten der Energieforschung sei die Forschung zu ergänzen um:

- Erforschung und Prognose der Veränderungen der Abfall- und Reststoffströme für die Bioenergienutzung in der Bioökonomie (u. a. Menge, Anfallorte, Zusammensetzung, Eigenschaften)
- Nutzung von Synergien zwischen der Biokraftstoffproduktion, der stofflichen Biomassennutzung sowie der Produktion von Lebens- und Futtermitteln bei der Prozessentwicklung und -optimierung integrierter Bioraffinerien
- Entwicklung von sektorübergreifenden biobasierten Nutzungskaskaden (z. B. Baustoffe, Chemikalien und Energie) und Unterstützung von Geschäftsmodellen

Für alle genannten Entwicklungsbereiche sei es notwendig, geeignete Methoden, beispielsweise für Konzeptbewertungen, System- und Nachhaltigkeitsanalysen, Life Cycle Assessments (LCA), sektorgekoppelte Energiesystemmodelle zur adäquaten Abbildung der Bioenergie und ihren Transformationspfaden sowie sozioökonomische Untersuchungen zu den Akzeptanzvoraussetzungen, weiterzuentwickeln und anzuwenden.

Insbesondere die Empfehlungen aus dem Forschungsnetzwerk Bioenergie⁴²⁹ verdeutlichen einerseits die Kontinuität und andererseits die Neuausrichtung der Bioenergieforschung. Dabei seien die energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Entwicklungen sowie die zentralen Herausforderungen der Energiewende zu berücksichtigen. Hier seien die Energie- und Kosteneffizienz, Markthemmnisse, Netzausbau, Systemintegration, Klimaschutzbeitrag und lokale Emissionsminderung, Nachhaltigkeit und Partizipation zu nennen. Nach Ansicht der Akteure bestehen folgende Querschnittsaspekte: Normierung/Standardisierung, z. B. Brennstoffe, Komponenten, Emissionen, Nachhaltigkeit, Zertifizierungsfragen sowie die Weiterentwicklung der Analyse-, Berechnungs- und Bewertungsmethoden (Bioenergieprogramm). Es liegen detailliert ausgearbeitete und umfangreiche Analysen zu den bestehenden Bioenergieschwerpunkten vor, die den Stand von Wissenschaft und Technik sowie zukünftige Herausforderungen im Einzelnen begründen:

⁴²⁸ [B2]; [C1]; [H1] (AG3)

⁴²⁹ [H1]

Bioenergie im Wärmemarkt⁴³⁰

- Hochwertige Bioenergieträger und Qualitätsbrennstoffe aus biogenen Rest- und Abfallstoffen
- Emissionsfreie/-arme Biomassefeuerungen mit neuartigen und optimierten Verbrennungskonzepten in Kombination mit integrierten Emissionsminderungstechnologien in verschiedenen Leistungsbereichen einschließlich Anlagen zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme sowie Bioenergieanlagen mit hoher Brennstoffflexibilität
- Bi- und multivalente Versorgungssysteme für die Integration von Bioenergie und verschiedener erneuerbarer Wärmeoptionen und Speichertechnologien sowie flexibel einsetzbare Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen für biogene Festbrennstoffe.
- Innovative und integrierte System-Regelungs-Konzepte und Regler für eine systemdienliche Integration von Bioenergieanlagen und zur Umsetzung der Sektorkopplung
- Langzeitstrategien zur Wärmewende mit systemintegrierenden Biowärmelösungen sowie systemische Lösungsansätze für Wärmenetze und Quartiere

Bioenergie im Strommarkt⁴³¹

- Flexibilisierung der Stromproduktion (Biogas, Biomassevergasung und KWK, Biomasseheizkraftwerke) bei gleichzeitig hoher Gesamteffizienz
- Wechselwirkungen zwischen flexibler Strom- und Wärmeerzeugung, z. B. KWK
- Prognosebasierte Steuer- und Regelprozesse für effiziente Betriebsführung sowie Entwicklung von Betriebs- und Sicherheitskonzepten
- Effiziente Emissionsminderung
- Verbesserung der Prozessierbarkeit von biogenen Rest- und Abfallstoffen
- Kombination von Biomasse und Power-to-X, z. B. biologische Methanisierung

Da bereits grundlegende Bioenergie-Verfahren weitestgehend im Bereich der Grundlagenforschung entwickelt wurden, empfehlen die Akteure mehrheitlich, die Forschungsfragen zukünftig – insbesondere die Technologieentwicklung und experimentelle Entwicklung – in der angewandten Forschung zu bearbeiten. Um die Lücke zwischen Forschung und Markteinführung sowie beim risikoreichen Upscaling bis zur Marktreife zu schließen, gebe es die Notwendigkeit von praxisnahen Pilot- und Demonstrationsprojekten und Referenzanlagen im industriellen Maßstab⁴³².

⁴³⁰ [H1] (AG2)

⁴³¹ [H1] (AG1)

⁴³² [C1]; [H1]

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die breite Einführung von Innovationen und deren wirtschaftliche Tragfähigkeit in Deutschland stoße auf folgende wesentlichen Markthemmnisse: die sehr niedrigen fossilen Brennstoffpreise, die schwierigen energie- und umweltpolitischen Rahmenbedingungen, die Verschärfung von Emissionsgrenzwerten und Restriktionen (BImSchG, BImSchV, KrWG, Düngemittelverordnung) und die Gestaltung des Ordnungsrahmens⁴³³. Die Akteure nennen als Querschnittsaspekte für den künftigen Bedarf an Forschung und Entwicklung die spezifische Prüfung der jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen und die Erarbeitung wissenschaftlicher Handlungsempfehlungen zur Anpassung der Rahmenbedingungen und bestehenden Regelungen. Dies könne den Markteintritt der neuen Produkte und Verfahren ermöglichen und erleichtern.

Weiterhin regen sie u. a. eine staatliche Förderung bei der Markteinführung neuer, nachhaltiger Prozesse, Produkte und Technologien sowie Förderprämien für besondere Umweltverträglichkeit an. Ergänzend können Lenkungsabgaben für die zu vermeidenden Emissionsarten bei fossilen Referenzsystemen sowie die Einführung langfristig kalkulierbarer Rahmenbedingungen für die bei langfristigen Investitionsgütern notwendige Planungssicherheit hinzukommen.

Eine andere Forderung betrifft die Entwicklung von Methoden und Prüfverfahren. Dies soll sich bis hin zu Mess- und Prüfnormen sowie für die Produktüberwachung zur kontinuierlichen Qualitätssicherung, zum Nachweis der gesundheitlichen und ökologischen Unbedenklichkeit neuer Produkte und zur verlässlichen Dokumentation (Standardisierungs- und Zertifizierungsverfahren) erstrecken.

Die Bevölkerung und die Nutzer seien in die Zulassung von neuen Verfahren, Produkten und Brennstoffen und in die rechtlichen Änderungen frühzeitig einzubinden, um das Vertrauen der Konsumenten in die „Wertigkeit“ der Produkte zu stärken. Zudem sei die begleitende Erforschung der Beziehungen und Bedarfsstrukturen der beteiligten Marktteilnehmer sowie der Kunden- und Nutzerakzeptanz wichtig. Sie ermögliche, die sozioökonomischen Rahmenbedingungen und Marktchancen für die praktische Umsetzbarkeit der zu entwickelnden Konzepte aus Nutzersicht zu erkennen und bei der Entwicklung und Markteinführung zu berücksichtigen.

⁴³³ [C1]; [H1]

3.14 Industrielle Abwärmenutzung

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Bei nahezu jedem industriellen Prozess entsteht Wärme. Deren Temperaturniveau reicht von vergleichsweise niedrigen 40 °C, die bei technischen Anlagen wie etwa Kompressoren oder Pumpen entstehen, bis zu über 1.000 °C bei Verbrennungsprozessen. Mehreren Studien zufolge liegt das Abwärmepotenzial in Deutschland zwischen etwa 88 und 260 TWh pro Jahr. Die Weiterentwicklung von Technologien zur Nutzung dieser Abwärme in der Industrie sei deshalb ein Ziel von höchster Bedeutung für energieeffiziente Prozesse, Produkte und Leistungen in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen⁴³⁴.

□ Entwicklungsziele⁴³⁵

- Thermoelektrik: Systemseitig sind bisher nur wenige Prototypen gefertigt; noch wurden keinerlei Skaleneffekte bei der Materialiensynthese bzw. bei Modul- und Systemfertigung erreicht
- Organic-Rankine-Cycle (ORC): Weiterentwicklung und Kostenreduktion der Systeme; Integration in Produkte mit Abwärmeeinfall oder -abfuhr, wie z. B. Kompressoren oder Kühler
- Effiziente Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel: Alternative Low-GWP Kältemittel; neue effizientere Wärmepumpentechnologien wie Magneto-, Elasto- oder Elektrokalorik; thermisch getriebene Wärmepumpen und Kältemaschinenprozesse; das Arbeitsmittel Wasser
- Wärmeübertragung: Modularer oder bauraumangepasster Aufbau von Wärmeüberträgern unter flexibler Wahl von Materialien; Optimierung von Bauraum und Bauteilkosten; Optimierung des Wärmetransports an den Übergangsschichten
- Wärmenetze: Erarbeitung niederexergetischer Gesamtkonzepte und Produkte zur Nutzung der Niedertemperaturwärme durch Integration von Mehrquellensystemen; Methoden zur Transformation von hydraulischen Systemen
- Energiemanagement
- Thermische Speicher: Innovative Phase-Change-Materials (PCM), Wärmetauscher und Speicherkonzepte; passive und aktive PCM-Speicher; neue Materialien für Hochtemperatur-Speicher im Falle durchströmter Schüttungen; kostengünstige, kompakte Lösungen für Feststoffspeicher für industrielle Anwendungen⁴³⁶

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Der in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren genannte Forschungsbedarf lässt sich wie in der folgenden Tabelle gezeigt, in neue Förderbereiche, die auf Anregung der Akteure in Zukunft gefördert werden sollten, sowie in bewährte Themenschwerpunkte unterteilen, die aus dem laufenden Programm in das neue, 7. Energieforschungsprogramm übernommen werden sollten.

⁴³⁴ [H2]

⁴³⁵ Alle: [H2], außer letzter Spiegelstrich

⁴³⁶ [E6]; [F1]; [F2]; [F3]; [H2]

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Organic-Rankine-Cycle • Energiemanagement • Effiziente Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel • Wärmenetze • Energiemanagement 	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmetauscher • Hochtemperaturwärmepumpen • Industrielle Wärmespeicher • Thermoelektrik • Abwärmenutzung (z. B. zur Vorwärmung von Ausgangsstoffen, in Produktion, Weiter- und Endbearbeitung auf Basis industrieller Abwärme der Prozessketten)

Im Bereich der Thermoelektrik müssen den Akteuren zufolge hinsichtlich der angestrebten Skaleneffekte neue Konzepte erarbeitet werden, um die Systemkosten signifikant zu reduzieren und gleichzeitig eine modulare Bauweise zu ermöglichen. Beispielsweise ließe sich durch weitere Materialoptimierungen und -entwicklungen – hinsichtlich der Steigerung der Effizienz über einen breiten Temperaturbereich bzw. über eine Reduktion der Kosten durch Verwendung kostengünstigerer Materialien und automatisierter Herstellprozesse – ein wesentlicher Entwicklungsschub erreichen⁴³⁷.

Für die ORC-Technologie seien Entwicklungsziele, die Anwendungen im Niedertemperaturbereich, wie bei Kühlern, zu optimieren sowie Kenntnisse über Laufzeiten und Temperaturniveaus zu sammeln. Hierfür müsse mittels Messkampagnen eine Datenbasis für die zielgerichtete Entwicklung von passenden ORC-Systemen geschaffen werden. Technologischer Schwerpunkt bei der Weiterentwicklung der ORC-Technologie sei die Anpassung auf geringe Antriebstemperaturen, sodass Wärme ab 70 °C genutzt werden könne. Weiterhin stehen eine optimierte Gestaltung der Verdampfer mit geringen Temperaturdifferenzen zur Wärmequelle, kostengünstige Expansionsmaschinen und betriebssichere Arbeitsmedien mit geringem GWP im Fokus des Interesses⁴³⁸.

Effiziente Wärmepumpen ohne schädliche Kältemittel weisen aus Sicht der Akteure einen besonderen Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Verwendung alternativer Low-GWP Kältemittel auf. Hier bestehe aufgrund der F-Gase-Verordnung, die die Verwendung der klassischen Kältemittel immer weiter reglementiert, ein verstärkter Bedarf, Alternativen zu entwickeln. Die verfügbaren Kältemittel erforderten Anpassungen des Verdichters, des Ölmanagements und der Wärmeüberträger. Darüber hinaus basierten industrielle Abwärmeprozesse auf anderen Temperaturniveaus sowohl auf der Quellen- als auch auf der Senkenseite des Prozesses. Das erfordere ebenfalls die Anpassung und Weiterentwicklung der Kältekreis Komponenten. Zusätzlicher Entwicklungsbedarf bestehe im Bereich neuer effizienter Wärmepumpentechnologien wie Magneto-, Elasto- oder Elektrokalik, welche ganz ohne den Einsatz kritischer Fluide auskämen. Neben den elektrisch getriebenen Prozessen seien thermisch getriebene Wärmepumpen und Kältemaschinenprozesse, die z. B. auf dem Grundprinzip der Ab- oder Adsorption basierten, von großem Interesse. Für das Arbeitsmittel Wasser sei eine Erweiterung des Arbeitsbereiches unter den Gefrierpunkt eine zentrale Herausforderung, die eine deutliche Erweiterung des Anwendungsspektrums thermischer Verfahren erlauben würde⁴³⁹.

⁴³⁷ [C4]; [H2]

⁴³⁸ [C4]; [H2]

⁴³⁹ [H2]

Bei der Wärmeübertragung und in der Entwicklung von Wärmeüberträgern für Abwärmeprozesse seien Bauformen zu entwickeln, die – z. B. durch einen modularen oder bauraumangepassten Aufbau und die flexible Wahl von Materialien – eine hohe Anpassungsfähigkeit im Einsatz ermöglichen. Hierfür seien zunächst geeignete Auslegungsverfahren zu entwickeln, die unter Berücksichtigung der thermischen und hydraulischen Effizienz die Optimierung von Bauraum und Bauteilkosten erlauben. Mit steigenden Ansprüchen bezüglich Kompaktheit und Effizienz von Wärmeüberträgerprozessen spiele der Wärmetransport eine immer wichtigere Rolle⁴⁴⁰.

Bei Wärmenetzen existiere in technischer Sicht Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei der Erarbeitung von niederexergetischen Gesamtkonzepten und Produkten zur Nutzung der Niedertemperaturwärme durch Integration von Mehrquellensystemen. Ein weiteres Thema seien Methoden zur Transformation von hydraulischen Systemen. Durch die zeitlichen Schwankungen des Wärmedargebots und der Wärmenachfrage bestehe Forschungsbedarf für Technologien zur Flexibilisierung von Wärmenetzen⁴⁴¹.

Bei den Technologien zur thermischen Speicherung bestehe Forschungsbedarf zu neuen Materialien, wie z. B. Phase-Change-Materials (PCM), Wärmetauschern und Speicherkonzepten. Während bei passiven PCM-Speichern Wärmetauscher das Speichervolumen durchdrängen, seien bei aktiven PCM-Speichern die Wärmeübertragung und das Speichervolumen und damit die Speicherkapazität entkoppelt. Dies verursache jeweils spezifische Vor- und Nachteile und einen spezifischen Forschungsbedarf. Hinsichtlich der Hochtemperatur-Speicher bestehe Forschungsbedarf zu Materialien und – im Falle durchströmter Schüttungen – deren Verträglichkeit sowie dem Zusammenspiel mit Wärmeüberträgern zur Be- und Entladung. Insbesondere thermochemische Speicher mit dem großen Potenzial günstiger, kompakter und verlustfreier Langzeitspeicherung seien noch wenig ausgereift hinsichtlich Materialien und Speicherkonzepten. Bei den weiteren Speicherkonzepten, wie z. B. Feststoffspeichern, bestehe Forschungsbedarf hinsichtlich kostengünstiger, kompakter Lösungen für industrielle Anwendungen⁴⁴².

Im Energiemanagement ziele der Bedarf an Forschung und Entwicklung – insbesondere auch bei Demonstrationsvorhaben – auf die Regelung und Steuerung komplexer Abwärmesysteme zur Integration von alternativen Quellen. Weiterhin stehe die Entwicklung von Regelungen, die Abwärmeflüsse zu „smarten“ Erzeugern wandeln, genauso im Fokus wie die Entwicklung von Methoden zur schnellen Erfassung des dynamischen Profils von Abwärmepotenzialen zur Bewertung der Flexibilisierbarkeit des Abwärmepotenzials (Monitoring Methoden) oder Vorhersagemodelle für den zeitlichen Verlauf (Temperaturniveau, Leistung) von Abwärmequellen (model predictive control)⁴⁴³.

⁴⁴⁰ [H2]

⁴⁴¹ [H2]

⁴⁴² [E6]; [F1]; [F2]; [F3]; [H2]

⁴⁴³ [F2]; [H2]

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Um eine breite Wirksamkeit und einen flächendeckenden Einsatz der o. g. Technologien zu erreichen, sollte nach Ansicht der Akteure bereits in einer frühen Phase die Markteinführung nach erfolgreicher Technologie- und Produktentwicklung unterstützt werden. Regulatorische Anreize wie die ISO50001/3 seien hier zwingend weiterzuentwickeln und Mindeststandards für die Verbesserung von Energiekennzahlen im Energiemanagement zu berücksichtigen. Ein einfach zu handhabendes Markt-anreizprogramm für Unternehmen solle beim Markteintritt neuer Technologien helfen und unterstütze die Erreichung von signifikanten Stückzahlen. Dies führe zu niedrigeren marktgerechten Kosten und verbessere damit die Wettbewerbsfähigkeit⁴⁴⁴.

Bei der Einspeisung von elektrischer Energie ins Netz seien hohe technische und regulatorische Anforderungen zu erfüllen, um die Stromnetze stabil zu halten, wenn Photovoltaik- und Windenergieanlagen mit fluktuierender Leistung einspeisen. Für die Stromerzeugung aus Abwärme gelten die gleichen hohen Anforderungen, auch wenn im Einzelfall die Einspeisung elektrischer Energie deckungsgleich mit hohem Strombezug sei, z. B. für den Betrieb des Werks/der Abwärme-erzeugenden Anlage. Hier müsse zumindest eine Gleichstellung der Stromerzeugung aus Abwärme mit periodisch rückgespeistem Strom, z. B. von Kranen oder Hochregallagerantrieben, geschaffen werden, um unnötige Kosten zu vermeiden⁴⁴⁵.

Der administrative Aufwand, wie z. B. Anmeldung beim Netzbetreiber und Genehmigung, müsse besonders für Anlagen mit geringem Anteil am Gesamtstrombedarf des Unternehmens reduziert werden. Hier könnten 10 % der Stromeigenerzeugung von der EEG-Umlage und somit von der Anzeigepflicht beim Netzbetreiber befreit werden⁴⁴⁶. Dabei sollen allerdings EEG-Anlagen und BHKWs ohne Wärmenutzung ausgeschlossen sein. Langfristig könne eine CO₂-Steuer, wie z. B. in Kanada, Technologien zur Abwärmenutzung bei der weiteren Verbreitung helfen⁴⁴⁷.

⁴⁴⁴ [H2]

⁴⁴⁵ [C4]; [H2]

⁴⁴⁶ [C4]; [H2]

⁴⁴⁷ [H2]

3.15 Prozess- und Querschnittstechnologien zur Energieeffizienz und CO₂-Reduktion in der Industrie

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Der Einsatz optimierter Prozess- und Querschnittstechnologien zur Energieeffizienz und CO₂-Reduktion in der Industrie könne dafür sorgen, dass nicht nur die Anbieter und Nutzer von Energietechnik einen möglichen Startvorteil im sich intensivierenden internationalen Wettbewerb haben. Im Zuge des Umbaus des Stromsystems müssten auch industrielle Verbraucher veränderte Anforderungen erfüllen. Hierzu erscheine eine an das fluktuierende Stromangebot angepasste, flexible Produktion notwendig. In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren sprachen sich die Akteure dafür aus, überall dort, wo es technisch und prozessual sinnvoll sei, mit Energieeffizienzmaßnahmen Kostensteigerungen aufgrund steigender Umweltaforderungen oder hoher Energiepreise abzufedern.

Im Rahmen der Energiewende müssten Forschung, Technologieentwicklung und Innovation weiterhin mit hoher Priorität vorangetrieben werden. Sie seien Grundlage für Wachstum und Erfolg der deutschen Industrie. Das konsequente Bearbeiten der hier aufgezeigten prioritären Forschungs- und Technologiefelder werde dazu beitragen, die Energiewende von industrieller Seite zielgerichtet und effizient umzusetzen und die Position der deutschen Industrie weltweit zu stärken. Die hier identifizierten Themen versprächen eine hohe Effektivität für die weitere Gestaltung der Energiewelt von morgen. Besonders wichtig sei dabei die Hebelwirkung staatlicher Forschungsförderung. Diese diene vorrangig dazu, in heute noch wirtschaftlich unrentablen, aber chancenträchtigen Bereichen privatwirtschaftliche Aktivitäten anzustoßen und zu ergänzen⁴⁴⁸.

□ Entwicklungsziele

- Digitale Technologien in Forschung und Produktion für eine höhere Energieeffizienz⁴⁴⁹
- Eisen, Stahl und Nichteisenmetalle⁴⁵⁰
- Industrie- und Gasmotoren⁴⁵¹
- Tribologie⁴⁵²
- Chemische, mechanische und thermische Verfahrenstechnik⁴⁵³
- Fertigungstechnik⁴⁵⁴
- Hochtemperatursupraleitung (HTSL)⁴⁵⁵
- Materialeffizienz energieintensiver Rohstoffe, industrieller Ausgangsstoffe und Zwischenverbindungen sowie die Beseitigung, Reststoff- und Abfallbehandlung⁴⁵⁶
- Wasser- und Abwasserbehandlung⁴⁵⁷
- Prozesswärme⁴⁵⁸
- Solare Prozesswärme

⁴⁴⁸ [C2]; [H2]

⁴⁴⁹ [C2]; [C4]; [C7]; [F2]; [H2]

⁴⁵⁰ [C2]; [H2]

⁴⁵¹ [H2]

⁴⁵² [H2]

⁴⁵³ [B2]; [C2]; [F2]

⁴⁵⁴ [B2]; [C2]; [C4]; [F2]

⁴⁵⁵ [H2]

⁴⁵⁶ [E3]; [F1]; [H2]

⁴⁵⁷ [C2]; [H2]

⁴⁵⁸ [B2]; [C2]; [C4]; [C5]; [F2]

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Akteure identifizierten im Rahmen des Konsultationsprozesses viele zukunftssträchtige Technologien und Verfahren, die nach ihrer Einschätzung in das neue, 7. Energieforschungsprogramm aufgenommen werden sollten. Darüber hinaus enthalten die Expertenempfehlungen und Positionspapiere Forschungsansätze aus dem laufenden Programm, die als weiterhin wichtig eingestuft werden und folglich fortzuführen seien. Die jeweils genannten Forschungsbereiche sind in der folgenden Tabelle dargestellt und basieren im Wesentlichen auf der Zusammenstellung des Forschungsnetzwerks Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe⁴⁵⁹.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Eisenreduktion mit Wasserstoff • Inkrementelle Effizienzsteigerungen entlang der Prozesskette der Stahlherstellung • Flexibilisierung der Eisen- und Stahl-Produktion • Weitere Forschungsansätze zu Emissionsminderung und Effizienzpotenzialen in der Produktion sowie durch energieeffiziente Metallprodukte • Innovative Adsorptions- und Absorptionsprozesse und -medien; Alternativen zu Zeolith • Industrielle Kälteerzeugung; Kältetechnik im Handel • Optimierung der Wärme/Kälteerzeugung mit Strom • Systematisierung tribologischer Zustände unterschiedlichster Anwendungen • Lösung spezieller tribologischer Probleme • Globale Lösungsansätze zur Optimierung komplexer tribologischer Systeme • hocheffiziente Elektromotoren und andere Aktoren von dN bis kN • Die chemietechnologische Initiative ENPRO • Digitale Chemieanlagen • Effizienz inhomogen betriebener Mehrphasenreaktoren • Tolerante chemische Prozesse • Elektrochemische Synthese • Sektorkopplung und industrielle Symbiose • Energieeffiziente Wärmeübertrager 	<ul style="list-style-type: none"> • Innovative Entwicklungen für Thermoprozesse • Solare Prozesswärme • Neue Technologien zur Reduktion des Energieeinsatzes bei mechanischen, thermischen und physikalisch-chemischen Trennverfahren • Bereitstellung von Kälte und Wärme auf der Basis neuer FCKW-freier Technologien und besonders energieeffizienter Systeme • Entwicklung neuer Technologien zur rationellen Stromnutzung, über Energie- und Demand-Side-Management, hocheffiziente Elektromotoren und andere Aktoren sowie Optimierung der Wärme/Kälteerzeugung mit Strom und effiziente elektrische Haushaltsgeräte • Neue Technologien der Hochtemperatursupraleitung (HTSL) für die Energietechnik • Materialeffizienz energieintensiver Rohstoffe sowie industrieller Ausgangsstoffe und Zwischenverbindungen • Antriebstechnik und mechanische Kraftübertragung • Energieeffiziente chemische Prozesstechnik • Energieeffiziente Fertigungstechnik • Energieeffiziente Reststoff- und Abfallbehandlung/-verwertung • Energieeffiziente Wasserbehandlung • Querschnittstechnologien

⁴⁵⁹ [H2]

<ul style="list-style-type: none"> • Effizientes Recycling von strategischen Rohstoffen • Additive Fertigung • Optimierung der Prozesssteuerung und Regelung (künstliche Intelligenz, Datenhomogenisierung, Steuer- und Regelhardware) • Neue (optimierte) in-site-Sensorik zur syntheseangepassten Prozesssteuerung und -regelung • Neue Fertigungsverfahren • Effiziente Technologien für die Fertigung (Komponenten) und effiziente Fertigungsprozessgestaltung • (Energie- und Prozess-) Datenverfügbarkeit und Datenintegration • Komplexitätsreduktion interagierender Systeme • Nutzung von Abfällen aus Industrie, Gewerbe und Handel, Bioabfall und Haushaltungen als Rohstoff oder Energieträger • Energieeffiziente Beseitigungs- und Verwertungsverfahren • Schadenserkenkung im Wasserleitungssystem • Qualitätskontrolle der Wassereigenschaften zur Vermeidung ineffizienter Maßnahmen • Möglichkeiten für die Anwendung von Künstlicher Intelligenz in der Produktion • Verarbeiten großer Datenmengen und unscharfer Daten • Neue Möglichkeiten der effizienten Produktion durch Einsatz digitaler Technologien • Betrachtung der Produktion auf der Skala Produktionslinie–Werk–Standort • Digitale Vernetzung von Material-, Energie- und Datenströmen • Einsatz der Rechentechnik als Werkzeug in der Prozessmodellierung, Fertigungssimulation, bei Design und Auslegung von Bauteilen/Aggregaten • Effizienzsteigerung durch in-line und/oder dynamische Messverfahren zur Stoffüberwachung mittels maschinellem Lernen • Zustands- und Effizienzaussagen durch 	
---	--

<p>Sensorik zur direkten oder indirekten Feststellung von Betriebszuständen, Materialeigenschaften, Produkteigenschaften und -qualitäten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Predictive Maintenance • Entwicklung neuer Sensortechnologien für Fertigung, Produktion sowie kontinuierliche und diskontinuierliche Chemie • Verschaltung von Sensorik und Erhöhung der Aussagetiefe 	
--	--

Digitale Technologien in Forschung und Produktion für eine höhere Energieeffizienz sollten als ein wesentliches zusätzliches Entwicklungsziel für die kommenden Jahre Eingang in das neue Energieforschungsprogramm finden. Dabei falle den folgenden hochinnovativen Forschungsansätzen, eine besondere Rolle zu: der Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) in der Produktion, das Verarbeiten großer Datenmengen und unscharfer Daten, z. B. durch Lernverfahren, neuronale Netze und verteiltes Rechnen, die „neuen“ Möglichkeiten der effizienten Produktion durch Einsatz digitaler Technologien sowie die Betrachtung der Produktion auf der Skala „Produktionslinie–Werk–Standort“. Weitere Ansätze seien die digitale Vernetzung von Material-, Energie- und Datenströmen, der Einsatz der Rechentechnik als Werkzeug, z. B. CFD in der Prozessmodellierung, die Fertigungssimulation sowie Anwendungen bei Design und Auslegung von Bauteilen/Aggregaten.

Den nächsten Schwerpunkt bilden Effizienzsteigerungen durch in-line und/oder dynamische Messverfahren zur Stoffüberwachung, z. B. chromatographisch, optisch, spektroskopisch und phononisch, mittels maschinellem Lernen. Dabei gehe es insbesondere auch um Zustands- und Effizienzaussagen durch Sensorik zur direkten oder indirekten Feststellung von Betriebszuständen, Materialeigenschaften, Produkteigenschaften und –qualitäten, wie z. B. Körperschall, Drehmoment.

Das große Thema der Predictive Maintenance mit Bezugspunkten in die gesamte Anlagen- und Motorentchnik sowie die Entwicklung neuer Sensortechnologien, z. B. Laser, Oberflächenphononen, syntheseangepasste MS, Lambert-Beer, Lab on the Chip, nicht-chemische Ionensensoren, für Fertigung, Produktion sowie kontinuierliche und diskontinuierliche Chemie runden dieses übergeordnete Entwicklungsziel ab. Schließlich gehe es noch um die Verschaltung von Sensorik und Erhöhung der Aussagetiefe, z. B. neuronale Netze, ML > Steigerung der Prozessgenauigkeit und die Verringerung des Produktionsausschusses.

Eisen, Stahl und Nichteisenmetalle: Die Eisenerzreduktion findet den Akteuren zufolge in Deutschland mit Kohlenstoffmonoxid unter Einsatz von Koks und kohlenstoffhaltigen Ersatzreduktionsmitteln nahezu ausschließlich im Hochofenverfahren statt. Um die Klimaschutzziele zu erreichen, könnten alternativ Direktreduktionsanlagen mit hohen Anteilen Wasserstoff anstelle von Erdgas betrieben werden. Die Voraussetzung für eine entsprechende Anwendung von Wasserstoff zur CO₂-armen Stahlerzeugung sei die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff mit Strom aus regenerativen Quellen sowie dessen Speicherung und Verteilung. Die den Direktreduktionsanlagen nachzuschaltenden Elektrolichtbogenöfen müssten dabei ebenfalls mit regenerativem Strom versorgt werden. Für die erforderliche Weiterentwicklung der Technologien zur Direktreduktion hin zu einem gesteigerten Einsatz von Wasserstoff seien umfangreiche Forschungsvorhaben notwendig, die in den Bereich der innovativen Entwicklungen für Thermoprozesse fallen. Weitere Forschungsbereiche der Metallin-

dustrie lägen demnach im Bereich der inkrementellen Effizienzsteigerungen entlang der Prozesskette der Stahlherstellung, einer Flexibilisierung der Metallproduktion sowie weiterer Forschungsansätze zur Emissionsminderung. Abgerundet werde der künftige Forschungsbedarf schließlich über die Realisierung von Effizienzpotenzialen in der Produktion von Metallen, deren weiterer Ver- und Bearbeitung sowie die Gestaltung energieeffizienter Metallprodukte.

Indusriemotoren und Gasmotoren stellen einen wichtigen industriellen Forschungs- und Entwicklungsbereich dar. Hierin sind Disziplinen wie die energieeffiziente industrielle Antriebstechnik, das gesamte Feld der industriellen hocheffizienten Groß- und Elektromotoren und andere Aktoren von dN bis kN sowie die mechanische Kraftübertragung und Motorenkonzepte für stationäre Anwendungen enthalten. Ein besonderes Augenmerk sei auch auf effiziente Gasmotoren für stationäre aber auch dynamische Anwendungsfälle zu legen. Hierbei – wie auch bei allen übrigen Großmotoren, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden – vervollständige die fortgesetzte Erforschung der Technologien zur wirkungsvollen Abgasnachbehandlung und zu effizienten Getriebetechniken das Themenportfolio. Die im Forschungsbereich der Industrie- und Gasmotoren erforderlichen innovativen Konzepte zur Reduktion von Reibungsverlusten lieferten einen direkten Übergang in das Forschungsfeld der Tribologie.

Die Tribologie dürfe sich in ihrer Forschungsausrichtung nicht auf das Feld der Industrie und Gasmotoren beschränken, sondern müsse eine Systematisierung tribologischer Zustände unterschiedlichster Anwendungen anstreben. Damit ließe sich ein quasi generalisierter Forschungs- und Entwicklungsansatz hin zur Reduktion von Reibungsverlusten in bewegten Systemen in der Breite verfolgen. Dabei seien vielfältige Lösungen spezieller tribologischer Probleme zu erarbeiten. In einer Gesamtbeachtung aller entwickelten Teillösungen gehe es dann darum, globalere Lösungsansätze zur Optimierung komplexer tribologischer Systeme zu entwickeln. Das erfordere eine Vernetzung mit anderen Forschungsschwerpunkten.

Im industriellen Umfeld der chemischen, mechanischen und thermischen Verfahrenstechnik komme es regelmäßig zu hohen und höchsten Energieverbräuchen. Dadurch gehörten die hier aktiven Industriebereiche und Gewerbe traditionell in den Bereich der energieintensiven Industrien. Insofern seien hier höchste Einsparpotenziale gegeben, die auch künftig Forschungsaktivitäten hin zu innovativen und effizienten neuen Technologien, Anlagen, Apparaten und Komponenten zur Reduktion des Energieeinsatzes bei physikalischen, chemischen und verfahrenstechnischen Grundoperationen begründeten. Energieeffiziente chemische Verfahrenstechnik durch Verschalten der Grundoperationen sowie die energetische und verfahrenstechnische Optimierung von Prozessen, bei denen vornehmlich durch Einbringen mechanischer Energie die gewünschten Stoffeigenschaften hergestellt werden, gehörten selbstverständlich weiterhin dazu.

Neue und künftig stärker werdende Entwicklungsrichtungen beständen im Bereich der „Digitalen Chemieanlagen“, der Effizienz inhomogen betriebener Mehrphasenreaktoren, der toleranten Prozesse, der elektrochemischen Synthesen, der Sektorenkopplung sowie der industriellen Symbiose und energieeffizienterer Wärmeübertrager. Als rohstoffarmes Land, das sich am Weltmarkt versorgen muss, kämen in Deutschland als künftige Forschungsziele außerdem in besonderer Weise ein effizientes Recycling von strategischen Rohstoffen, die additive Fertigung, eine umfassende Optimierung von Prozesssteuerung und Regelung, z. B. mittels künstlicher Intelligenz, Datenhomogenisierung,

Steuer- und Regelhardware, sowie die hier unterstützende neue, optimierte in-site-Sensorik zur syntheseangepassten Prozesssteuerung- und regelung hinzu.

Die Fertigung sei das Rückgrat der deutschen Volkswirtschaft. Hunderttausende Arbeitsplätze in der Industrie sind in Deutschland direkt in der Fertigung oder mit deren Umfeld verbunden. Auf Unternehmen der Fertigungstechnik entfällt demnach ein bedeutender Anteil des Endenergiebedarfs im verarbeitenden Gewerbe. Dieser liege je nach Methodik der Bilanzierung bei 15 bis 25 %. Daraus ergebe sich die Herausforderung für die zukünftige Forschung, die Komplexität dieses Forschungsfeldes zu bewältigen und darüber hinaus neue Entwicklungen voranzutreiben. Die Ausrichtung der Forschung solle dabei den Leitlinien energieoptimiert, energieflexibel sowie themenübergreifend/disziplinvernetzend folgen. Gleichzeitig sei es im Themenfeld ein wichtiges Ziel, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln. Zu diesem Zweck haben die Akteure fünf Schwerpunkte für die zukünftige Forschung identifiziert, die über neue Fertigungsverfahren, effiziente Technologien für die Fertigung (Komponenten) und effiziente Gestaltung der Fertigungsprozesse zu wesentlichen Fortschritten beitragen könnten. Unterstützt durch einen DV-orientierten Ausbau und eine Zusammenführung hin zur größtmöglichen (Energie- und Prozess-) Datenverfügbarkeit und Datenintegration solle der Versuch unternommen werden, eine Reduktion der Komplexität interagierender Fertigungssysteme zu erreichen. Ein wesentlicher Schlüssel liege in dem konsequent parallel zu verfolgenden Aus- und Aufbau der Befähigung der künftig benötigten Personalressourcen. Ein erfolgreicher Transfer von aktuellen und künftigen Entwicklungen in die Märkte sei nur über entsprechend qualifizierte Fachkräfte möglich.

Die Hochtemperatursupraleitung (HTSL) liefere als Querschnittstechnologie bereits eine Vielzahl von attraktiven Anwendungen in Energie, Medizin, Transport, Industrie und Wissenschaft. In der Energietechnik sei durch HTSL grundsätzlich eine deutliche Verbesserung der Effizienz bei kompakterer Bauweise erreichbar und es würden neue Anwendungen, wie z. B. der Strombegrenzer und der magnetische Energiespeicher, überhaupt erst möglich. Die Leitlinie für die zukünftige Förderung von Forschung und Entwicklung bilde eine Beschleunigung der Anwendungsentwicklung und insbesondere auch das Erschließen neuer Anwendungsfelder. Dazu müssten in der künftigen Forschungsrichtung Kernthemen, wie verbesserte und ausgebaute Leitereigenschaften und die Leiterfertigung, umfassendere Technologie- und Anwendungsentwicklung sowie insbesondere die breitere und perspektivisch langreichende Demonstration von HTSL-Anwendungen, weiter verfolgt werden. Durch eine entsprechende thematische Gliederung seien dabei alle relevanten Forschungsaspekte von der Material- bis hin zur Systemintegration zu betrachten. Die Bandbreite der Anwendungen, z. B. Elektromotoren, Stromschienen, Automatisierungskomponenten, dürfe nicht eingeschränkt werden. Sie sei jedoch eindeutig auf energietechnische Anwendungen und Beiträge zur Erhöhung der Energieeffizienz fokussiert.

Die Akteure schätzen den Bereich Materialeffizienz energieintensiver Rohstoffe, industrieller Ausgangsstoffe und Zwischenverbindungen als innovativen, neuen energiewirtschaftlichen Forschungsbereich ein. Dabei gehe es um die Nutzung von Abfällen aus Industrie (z. B. Schlacken, Rotschlamm, Lösungsmittel), Gewerbe und Handel (z. B. Rückbauabfälle, Fette, Papier, Mischabfall, Schredderleichtfraktion), Bioabfall (Grünschnitt, Ernteabfall, Gülle) sowie energieeffiziente Beseitigungs- und Verwertungsverfahren. Zunehmend werden die Haushaltungen als Rohstofflieferant oder Energieträger gesehen. Das bedeutet, dass neben den klassisch industriellen insbesondere auch nichtindustrielle und nichtmineralische Massenabfälle, z. B. aus Gelber Tonne, Hausmüll, Gewerbeabfall, Bioab-

fall und Altpapier, im großen Umfang sowohl energetisch wie auch stofflich verwertet werden könnten. Vor der Weiterverwendung müssten sämtliche zu verwertenden Abfälle verschiedene energieintensive Sortier-, Klassier- und Aufbereitungsschritte durchlaufen, die wiederum individuell energieeffizient zu gestalten seien. Die für die Folgenutzung sortierter Abfälle notwendigen chemischen (z. B. Zusammensetzung, Reinheit), physikalischen (Korngröße) und stofflichen (z. B. Brennwert, Transportierbarkeit) Eigenschaften seien einzustellen. Beispielsweise seien im Fall einer vorgesehenen biologischen Verwertung (z. B. Vergärung) Parameter wie Wassergehalt oder Gasbildungspotenzial relevant.

In Kenntnis des jeweiligen spezifischen Materialverhaltens seien Verfahren zu entwickeln und zu optimieren, die den gesamten Stoffstrom inklusive aller Teilströme in energetischer Hinsicht sowie in Bezug auf die Schutzgutgefährdung verbessern (z. B. Gärrestausbringung, Störstoffe in Sortierchargen). Damit sei die energieeffiziente Gestaltung etablierter Prozesse in diesem Forschungsfeld ebenso ein Thema wie die Entwicklung gänzlich neuer Prozesse. Diese sollten vorrangig das Ziel verfolgen, energieintensive Prozesse durch energieeffiziente zu substituieren. Konkrete Entwicklungsziele könnten dabei sein: die Synthesegasherstellung aus Abfällen, die Carbid-Herstellung (stoffliche Nutzung des Kohlenstoffs aus Abfällen in Bulk-Chemikalien), eine Erhöhung der Sortiertiefe und Sortierqualität mittels erweiterter Sensorik und Digitalisierung, das Labeling von Sortierqualitäten (Altpapier, Kunststofffraktionen) zur Verbesserung der stofflichen Verwertbarkeit von Massenabfällen, eine Kläranlagenoptimierung durch intelligente Regelung, die Pilotierungen von Biogaserzeugung beim Kompostierungsprozess (EnBV) mit Berücksichtigung der Integrierbarkeit in bestehende Anlagen sowie eine möglichst breite Technologieübertragung auf andere Abfallarten (von Gelber Tonne auf Restabfall).

Weitere Forschungsarbeiten betreffen die optimierte Wasserbehandlung. Hierbei gehe es darum, Themen wie energieeffiziente Lösungen für Prozess- und Trinkwasser sowie effiziente Wassergewinnungs-, -aufbereitungs-, -verteilungs- und -versorgungssysteme zu verfolgen. Um die energetische Nutzbarkeit auszuweiten, sollten auch die Wärmerückgewinnung aus Abwässern sowie die energieoptimierte Abwasserförderung weiter untersucht werden. Neu hinzugekommen sei für das künftige Themenportfolio mit Blick auf die Sicherstellung des Betriebs, die verschärften Anforderungen an die Reinhaltung und die bundesweit älter werdenden Quellen, Wasserleitungs- und -transportsysteme, die Schadenserkennung im Leitungssystem (Druckabfallüberwachung, Leckortung) sowie die Qualitätskontrolle der Wassereigenschaften zur Vermeidung ineffizienter Maßnahmen (z. B. Verlustwasser, Haltungsreinigungen, überflüssige Baumaßnahmen).

Der Themenbereich der Prozesswärme fokussiere sich traditionell und auch künftig auf den Bedarf an neuen Technologien zur Bereitstellung von Prozesskälte und -wärme auf Basis umweltfreundlicher und besonders energieeffizienter Systeme mit geringem Treibhausgas-Potenzial. Technologisch gehörten in diesen Bereich die Entwicklungen zu innovativen Wärmepumpen (z. B. Zeolith-Wärmepumpe) und zu Wärmespeichersystemen, wie sie auch im Bereich der Abwärmenutzung benötigt würden. Die Akteure empfehlen, hinsichtlich der Prozessführung innerhalb der Systeme innovative Adsorptions- und Absorptionsprozesse und -medien zu betrachten und zu entwickeln, um eine Alternative zu den bereits bekannten und weiter untersuchten Zeolithen zu etablieren. Über die Klärung von grundlegenden Fragestellungen hinaus sei mit technologischem Fokus insbesondere die industrielle Kälteerzeugung sowie – stärker in die Anwendungsbreite orientiert – die Kältetechnik in Gewerbe und Handel, über eine wirkungsvollere Optimierung der Wärme und der Kälteerzeugung

mit Strom, relevant. Es bestünden Übergänge und Anknüpfungsmöglichkeiten zur solaren Prozesswärme.

Im Themenbereich der solaren Prozesswärme sei es weiterhin das übergeordnete Entwicklungsziel, den Einsatz der Solarthermie im gewerblichen Bereich für industrielle Prozesse insbesondere im Temperaturbereich größer als 100 °C anzustoßen. Erreicht werden solle dies über die Entwicklung von geeigneten hydraulischen und systemtechnischen Konzepten zur Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse. Hierbei seien vorhandene Abwärmepotenziale primär zu nutzen, um einen abgesenkten Energieverbrauch zu erreichen. Voraussetzung dafür seien weiterhin Entwicklungen im Bereich leistungsfähiger Mitteltemperaturkollektoren im Temperaturbereich von 100 bis 250 °C. Diese ließen sich für industrielle Prozesswärme, Kühlung und Fernwärme einsetzen. Außerdem gehe es um die Entwicklung von Mitteltemperaturspeichern im Bereich bis ca. 150 °C. Wichtig hinsichtlich einer künftigen Marktfähigkeit seien, wie im Bereich der HTSL, innovative Pilot- und Demonstrationsanlagen für solaren Prozesswärmeanlagen (> 0,5 MW) im Temperaturbereich von 100 bis 250 °C für Anwendungsfälle mit hohem Verbreitungspotenzial. Insbesondere dazu würden spezialisierte Auslegungs- und Planungstools für eine integrale Planung, Bewertung und Betriebsführung sowie die Entwicklung geeigneter Monitoringkonzepte benötigt.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Nach Ansicht der Akteure fielen die Entwicklungshemmnisse und Markthürden im Bereich industrieller Prozess- und Querschnittstechnologien themenspezifisch unterschiedlich aus. Exemplarisch sollen an fünf Entwicklungszielen die jeweiligen Unterschiede aufgezeigt werden.

Den Bereich der Tribologie dominiere die ausgeprägte Interdisziplinarität von physikalisch/chemischer Grundlagenforschung auf der einen und die stark anwendungsgetriebene Entwicklung von Werk- und Schmierstoffen auf der anderen Seite. Dadurch böten sich enorme Chancen für weitere große Fortschritte der Tribologieforschung und der breiten Umsetzung von Maßnahmen für reibungsoptimierte Maschinen und Anlagen.

Die Herausforderungen des Themenfeldes Fertigungstechnik im Kontext der Energieforschung lägen dagegen in einer enormen Komplexität des Themas. Diese könne nur durch ein Zusammenspiel verschiedener Fachdisziplinen, wie Maschinenbau, Elektrotechnik, Informatik, Betriebswirtschaft, Bauingenieurwesen, Architektur und Arbeitswissenschaften, bearbeitet werden. Hemmnisse ergeben sich demnach im industriellen Kerngeschäft durch die häufig nicht im Fokus stehenden energetischen Potenziale der Industrie. Weiterhin bestehe ein teilweise begrenzter Zugang der Anwender zum Technologielieferanten. Die Komplexität der Thematik ergebe sich aus der unsicheren zeitlichen und preislichen Entwicklung von Technologien und Energiepreisen, den sich ändernden gesetzlichen Vorgaben sowie dem steigenden Ausfallrisiko der Energieversorgung, z. B. durch den Eingriff ins Lastmanagement. Ein weiteres Entwicklungshemmnis seien Transaktionskosten durch fehlendes energie-technisches Wissen bei den Beteiligten und bei der Wissensbeschaffung. Ergänzend käme die Heterogenität der Branchenanwendungen in den unterschiedlichen Industriesektoren noch hinzu. In Bezug auf das wirtschaftliche Potenzial energieeffizienter Technologieentwicklungen fehle sehr häufig noch die Information über die konkret vorliegenden Energieverbrauchs- und Energiekostenschwerpunkte und somit bestünden keine oder wenig Kenntnis über das tatsächliche Energieeinsparpotenzial.

Im Eisen- und Stahl-Bereich sei neben den o. g. Inhalten ein besonderes Ziel, dass neben langfristigen Projekten auch kleinere Studien, z. B. Meta-Studien, mit geringerem Fördervolumen kurzfristig möglich sein sollten. Die Laufzeiten lägen dabei unter einem Jahr. Für solche Studien fehlten aktuell die Förderinstrumente. Zudem seien Möglichkeiten zu Leuchtturmprojekten interessant. Das sind Großprojekte mit wenigen Partnern sowie hohen Fördersummen und Eigenleistungen der Industriepartner. Von diesen Projekten ginge eine Signalwirkung für mögliche Folgeprojekte aus.

Anwendungen in der Energietechnik besitzen üblicherweise eine sehr lange Lebenszeit von mehr als 20 Jahren, sodass die Markterschließung mit neuen HTSL-Technologien in der Regel über die langjährige Demonstration wichtiger Betriebseigenschaften erfolge, wie z. B. der Zuverlässigkeit. Deshalb erfordere die Beschleunigung des Einsatzes supraleitender Anwendungen eine umfassende Feld- und Nutzererfahrung, um die herausragenden Möglichkeiten und die Anwendungsreife demonstrieren zu können. Weiterhin dienten Demonstrationsvorhaben dazu, Schwachstellen zu identifizieren und zukünftigen Bedarf an Forschung und Entwicklung abzuleiten. Insofern liege der Fokus zukünftiger Entwicklung auf der Umsetzung weiterer Demonstratoren zur Schaffung von Betriebserfahrungen, dem Schließen der Lücken zwischen Demonstrator und Prototypenanwendung (> TRL6), dem Weiterverwenden der Demonstratoren nach Projektende sowie dem Betrieb über die vorgesehene Projektlaufzeit hinaus. Hierfür benötigten Endanwender Anreize, um diese neuen Technologien einzusetzen.

Mit Blick auf die digitalen Technologien in Forschung und Produktion für Energieeffizienz seien in vielen Fällen grundlegende Digitalisierungsprozesse in den Unternehmen vorhanden. Art und Auswahl der Datenerfassung sei jedoch in der Regel nicht ausreichend, um KI oder andere Digitalisierungsmaßnahmen erfolgreich einzusetzen. Entsprechend beurteilen die Vertreter aus Wirtschaft und Industrie das Potenzial der Einsatzmöglichkeiten von Digitalisierungsmaßnahmen und KI als sehr hoch. Die Frage nach dem tatsächlichen Sachstand der Praxis in einzelnen Unternehmen lässt sich hingegen schlecht einschätzen. Auch die Beurteilung des praktischen Nutzens ist schwierig. Obwohl es viele Ideen und Ansätze gibt, sei hier die Demonstration konkreter, nachvollziehbarer und umgesetzter Anwendungen sowie die Darstellung der sich daraus ergebenden technischen und wirtschaftlichen Vorteile notwendig. Besonders der Schritt von der Idee zu einer realen Umsetzung sei für den industriellen Anwender noch eine große Herausforderung. Vielen Unternehmen falle es heute noch schwer, den „richtigen“ Ansatz für ihren jeweiligen Anwendungsfall auszuwählen und damit die eigene Aufgabenstellung umzusetzen. Aus diesem Grund sei auch eine Abschätzung des wirtschaftlichen Erfolgs a priori nicht qualifiziert möglich. Es gebe quantitativ und qualitativ zu wenig Fachpersonal, das in den Unternehmen sofort aktiv werden könne und das notwendige Knowhow besitze. Die Entwicklung der eigenen Methodenkompetenz in den Unternehmen sei jedoch nicht die einzige Herausforderung. Wichtig sei auch, dass verschiedenste Tätigkeitsbereiche zusammengebracht und ein einheitliches Verständnis für die neuen Fragestellungen entwickelt werden müssen. In diesem Zusammenhang sei es notwendig, Zeit für die Mitarbeiter zur Verfügung zu stellen, damit die Entwicklungen nicht im „normalen Tagesgeschäft“ untergingen. Besonders kleine und mittlere Unternehmen stelle dies vor eine große Herausforderung. Zusammenfassend sei festzustellen, dass Unternehmen über die Chancen und Möglichkeiten der Digitalisierungsmaßnahmen und des KI Einsatzes wegen der meist unzureichenden Kenntnis in der industriellen Breite und wegen der fehlenden personellen Ressourcen nicht gut vorbereitet seien. Die Forschung zu Digitalisierungsmaßnahmen und zu KI müsse zunehmend dabei helfen, die bestehenden Möglichkeiten aufzuzeigen.

3.16 Energiespeicher: Elektrisch, elektrochemisch und Elektromobilität

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren schätzen die Akteure die Bedeutung der elektrochemischen Speicher für die Energiewende als hoch ein. Diese Technologie gehöre zu den relevantesten Themen⁴⁶⁰. Als wichtige Einsatzgebiete von Energiespeichern in der Energiewirtschaft seien die Flexibilisierung des Energiesystems⁴⁶¹ sowie ein ressourceneffizienter, kostengünstiger Netzbetrieb zu nennen⁴⁶². Dazu könnten nicht nur stationäre Energiespeicher sondern auch Elektrofahrzeuge am Netz (Vehicle-to-Grid) beitragen⁴⁶³. Für den Ausbau der Elektromobilität sei jedoch der Aufbau einer effektiven, flächendeckenden Ladeinfrastruktur notwendig⁴⁶⁴.

□ Entwicklungsziele

- Integration von elektrochemischen Speichern in das künftige Energiesystem (Geschäftsmodelle erproben und neue Einsatzbereiche erschließen, technische Machbarkeit und wirtschaftliche Betriebsführung zeigen)⁴⁶⁵ sowie Vehicle-to-Grid bei Elektromobilität⁴⁶⁶
- Digitalisierung für intelligente Produktionskonzepte („Production on Demand“) bzw. Industrie 4.0 für Batterien und Systeme⁴⁶⁷ sowie bei Elektrofahrzeugen zur Steuerung von Ladevorgängen und der damit verbundenen Netzstabilität⁴⁶⁸
- Recycling (Fähigkeit zum Recyceln bei der Herstellung berücksichtigen und Technik zum Recyceln verbessern), Nachhaltigkeit, Umweltverträglichkeit, Ressourceneffizienz wegen knapper und teurer Rohstoffe, Wiederverwendung der Batterien (aus der Elektromobilität für stationäre Anwendungen) und weitere Nutzung von Komponenten („Second-Life“, „Second-Use“, „Re-Use“)⁴⁶⁹
- Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen, Regularien, Energiemarktdesign verbessern⁴⁷⁰
- Kostenreduktion (Zellen, Komponenten, Modul, System, Anlagen, Fertigung)⁴⁷¹
- Neue Zellchemien bzw. Batterietypen⁴⁷²
- Verbesserung von Sicherheit und Zuverlässigkeit⁴⁷³
- Batteriemanagementsystem und Leistungselektronik⁴⁷⁴
- Effizienzsteigerung, Wirkungsgrad⁴⁷⁵

⁴⁶⁰ [A2]; [C2]; [C4]; [H8] (AG4); [I1]

⁴⁶¹ [C4]; [C9]; [H8] (AG4); [H9] (AG4)

⁴⁶² [D1]; [H9] (AG4-2)

⁴⁶³ [A2]; [A3]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁴⁶⁴ [A1]; [D1]; [E4]; [F2]

⁴⁶⁵ [A3]; [A5]; [C4]; [C5]; [E6]; [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-1/AG4-2)

⁴⁶⁶ [A1]; [A2]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁴⁶⁷ [H9] (AG4-2); [E6]

⁴⁶⁸ [A1]; [A2]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁴⁶⁹ [A1]; [B2]; [E4]; [H1] (AG1-1); [H2]; [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-2); [I1]

⁴⁷⁰ [A3]; [B2]; [C4]; [C8]; [C9]; [D1]; [H8] (AG 4-3); [H9] (AG 4-2/AG 4-4)

⁴⁷¹ [A1]; [C4]; [C5]; [D1]; [E4]; [E6]; [H9] (AG4-2)

⁴⁷² [C2]; [E4]; [F3]; [H9] (AG4-2)

⁴⁷³ [C2]; [C5]; [C9]; [H9] (AG4-2)

⁴⁷⁴ [A3]; [C9]; [E4]; [I1]

⁴⁷⁵ [C5]; [E4]; [H9] (AG4-2)

- Erhöhung der Leistungsdichte⁴⁷⁶
- Erhöhung der Energiedichte⁴⁷⁷
- Lebensdauererhöhung, Verständnis von Alterungsmechanismen bzw. Degradation⁴⁷⁸
- Innovative Ladekonzepte für die Elektromobilität und deren intelligente Steuerung auch in Zusammenhang mit der Netzbelastung⁴⁷⁹

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Netzexperten verwenden den Begriff der „Energiespeicher“ häufig eher allgemein, womit im Zusammenhang meist „elektrochemische Energiespeicher“ bzw. Batterien gemeint sind. In vielen Papieren trafen die Aussagen zu Energiespeichern besonders auf Batterien zu. Daher werden sie nachfolgend so genannt, auch wenn in den Originalunterlagen nicht immer explizit „Batterie“ steht.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Demonstration der Integration in das künftige Energiesystem - Geschäftsmodelle erproben, neue Einsatzbereiche erschließen - technische Machbarkeit, wirtschaftliche Betriebsführung • Digitalisierung - Fertigung von Batterien und Systemen: intelligente Produktionskonzepte („Production on Demand“) bzw. Industrie 4.0 - Elektromobilität: Steuerung von Ladevorgängen bzgl. Netzstabilität • Standardisierung - Schnittstellen (IKT, Leistung) - Vereinheitlichung von Teilkomponenten - Prüfverfahren zur Qualitätsbewertung • Recycling - Recyclingfähigkeit bei Herstellprozess berücksichtigen - Technik des Recyclens verbessern • Second-Life - Wiederverwendung von Batterien aus der Elektromobilität für stationäre Anwendungen - Weiternutzung einzelner Batteriekomponenten 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenreduktion (elektrische und elektrochemische Speicher, Fertigung) • Weiterentwicklung von Batterien (Lithium-Ionen-Batterien, Redox-Flow-Batterien) • Spezifische Eigenschaften verbessern (Effizienz, Leistungsdichte, Energiedichte, Zyklenfestigkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit, Schnellladefähigkeit) • Batteriemanagementsystem und Leistungselektronik • Systemkomponenten zum Betrieb (z. B. Wechselrichter) • Systeme auf Anwendungen anpassen (PV-Eigenverbrauch erhöhen, Fluktuationen im Netz ausgleichen, Systemdienstleistungen, Frequenzregelung, Regelenergiemarkt) • Elektrofahrzeuge als Speicher am Stromnetz, Lastmanagement • Lastprognosen

⁴⁷⁶ [B2]; [E4]; [H9] (AG4-2)

⁴⁷⁷ [E4]; [H9] (AG4-2)

⁴⁷⁸ [C2]; [E4]; [H5] (AG4-3); [H9] (AG4-2)

⁴⁷⁹ [A1]; [A2]; [B1]; [C9]; [E4]; [H9] (AG1-1/AG2-5); [I1]

<ul style="list-style-type: none"> • Neue Zellchemien bzw. Batterietypen - Produktion in Deutschland, verringern der Importabhängigkeit - gut verfügbare, günstige Rohstoffe - verbesserte Eigenschaften • Laden von Elektrofahrzeugen - Ladeinfrastruktur - Ladetechnik - Energiemarktdesign, Regularien 	
---	--

Konsens besteht bei den Akteuren darin, dass die Weiterentwicklung der Batterietechnik notwendig sei⁴⁸⁰. Der Einsatz von dezentralen Batteriespeichern gehöre zu den wichtigsten Themen der Energiewende⁴⁸¹. Auch wenn sich die meisten Aussagen auf den stationären Bereich beziehen, wird ein hoher Entwicklungsbedarf bei der Elektromobilität gesehen⁴⁸². Dabei können neue Forschungsthemen und fortzuführende Schwerpunkte unterschieden werden. Die Gegenüberstellung ist in der obigen Tabelle dargestellt.

Die Akteure erachten es als wichtig, die Integration von (dezentralen) Energiespeichern in das künftige Energiesystem zu demonstrieren⁴⁸³. Der technische Reifegrad bei vielen Speichern sei schon so weit, dass sie bereits einsetzbar seien⁴⁸⁴. So sollte künftig das Augenmerk darauf gelegt werden, Geschäftsmodelle und neue Einsatzmöglichkeiten zu erproben. Dies habe vor allem im Hinblick auf die Flexibilisierung des Energiesystems zu erfolgen⁴⁸⁵. Explizit werden genannt: Netzstabilisierung und Bereitstellung von Systemdienstleistungen, z. B. Momentanreserve, Regelleistung, Spannungshaltung, Blindleistung zur Spannungshaltung, Kurzschlussleistung und Schwarzstartfähigkeit⁴⁸⁶. Auch Demand-Side-Management, Multiuse-Speicher sowie Blockchain, Cloudanwendungen und Smart Home stellten relevante Themen dar⁴⁸⁷.

Neben der direkten Netzanbindung sei es wichtig, weitere Einsatzbereiche zu demonstrieren, z. B. Speicher in Industrie, Gebäuden und Quartieren zur Erhöhung der Eigennutzung von Photovoltaik/Solarstrom sowie gekoppelte Speicher mit Windparks⁴⁸⁸. Ebenfalls sei zu untersuchen, inwiefern Elektrofahrzeuge als Kurzzeitspeicher geeignet seien (Vehicle-to-Grid)⁴⁸⁹. Dabei bedürfe die Belastung des Netzes durch die Ladevorgänge „Lock-in-Effekte“ der Entwicklung von innovativen Konzepten zur Steuerung und Regelung von Lastprofilen⁴⁹⁰. Allgemein müssten die Speichersysteme oftmals an die Anwendungen angepasst werden und Möglichkeiten zur Mehrfachnutzung analysiert werden⁴⁹¹.

⁴⁸⁰ [A1]; [A3]; [A5]; [B2]; [C4]; [C5]; [E4]; [F1]; [F2]; [F3]; [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-2)

⁴⁸¹ [B2]; [C4]; [C5]; [E4]; [H9] (AG4-2)

⁴⁸² [A3]; [E4]; [I1]

⁴⁸³ [B2]; [C4]; [C5]; [E6]; [H8] (AG4-3)

⁴⁸⁴ [H9] (AG4-1)

⁴⁸⁵ [E6]; [H9] (AG4-2)

⁴⁸⁶ [C4]; [H8] (AG4-3)

⁴⁸⁷ [H9] (AG4-2); [H8] (AG4-3); [C4]

⁴⁸⁸ [A1]; [C2]; [C5]; [H5] (AG4); [H7] (AG2-3)

⁴⁸⁹ [A1]; [A2]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁴⁹⁰ [A1]; [A2]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁴⁹¹ [G1]

Bei den Demonstrationsprojekten soll nach Ansicht der Akteure neben der technischen Machbarkeit besonders die wirtschaftliche Betriebsführung über die Lebensdauer optimiert werden⁴⁹². Hinzu kämen Recycling, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit, die als Themen für das neue, 7. Energieforschungsprogramm häufig genannt werden. Im Vordergrund stünden dabei speziell Second-Life bzw. Re-Use-Konzepte gebrauchter (Fahrzeug-) Batterien und dabei auch die stoffliche und komponentenbasierte Wiederverwendung⁴⁹³. Der Forschungsbedarf zu Recycling sei hoch⁴⁹⁴, so die Akteure. Zu den Themen Recycling, Materialgewinnung und -aufbereitung schlagen sie im Detail vor⁴⁹⁵:

- Entwicklung von Methoden und Verfahren zur effektiven und nachhaltigen Gewinnung kritischer Rohstoffe, insbesondere für Kobalt, Lithium und Nickel
- Entwicklung wirtschaftlicher und energieeffizienter Recyclingverfahren mit hohem Wiedergewinnungsanteil aller Aktivmaterialien

Die Digitalisierung und die IKT werden zunehmend wichtiger⁴⁹⁶, wobei besonders Potenzial in intelligenten Produktionskonzepten (Industrie 4.0) für Batterien und Batteriesystemen bestehe. Die Autoren schlagen auch Konzepte zur Verbesserung der Reaktionsfähigkeit der Produktion auf verschiedene Kundenanforderungen („Production on Demand“) vor⁴⁹⁷. Auch bei der nutzerfreundlichen und intelligenten Steuerung der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen und deren Integration in das Energiesystem („Vehicle-to-Grid“, „Smart Grid“) seien Digitalisierung und IKT wichtige Elemente⁴⁹⁸.

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren heben die Akteure die internationale Standardisierung von externen und internen Schnittstellen als wichtig hervor, wozu sowohl IKT- als auch elektrische Leistungsschnittstellen zählten⁴⁹⁹. Auch die Vereinheitlichung von Teilkomponenten sei zu bedenken⁵⁰⁰. Ebenso müssten Prüfverfahren, Regularien und Qualifizierungsmethoden zur Sicherheits-, Funktions- und Leistungsbewertung während und nach der Herstellung standardisiert werden⁵⁰¹.

Neben der Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien⁵⁰² bestehe künftig vermehrt Forschungsbedarf in neuen Batterietypen bzw. Zellchemien⁵⁰³. Hierzu zählen: Redox-Flow-Batterien⁵⁰⁴ oder die nächste Batteriezellgeneration, wie Post-Lithium (Metall/Luft, Metall/Schwefel)⁵⁰⁵, die Natriumbasierten Technologien (NaS und NaNiCl) und allgemein Festkörperbatterien („solid-state“)⁵⁰⁶. Alternative Materialien und Rohstoffquellen zu Lithium, Blei, Vanadium und Kobalt seien zu entwickeln⁵⁰⁷. Weiter seien noch Materialien für Hochleistungs- und Hochenergie-Batteriesysteme, die Stabilität

⁴⁹² [D1]; [E6]; [H9] (AG4-1/AG4-2)

⁴⁹³ [A1]; [B2]; [E4]; [E6]; [H1] (AG1-1); [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-2); [I1]

⁴⁹⁴ [I1]

⁴⁹⁵ [E4]

⁴⁹⁶ [A1]; [C7]

⁴⁹⁷ [E6]; [H9] (AG4-2)

⁴⁹⁸ [A1]; [A2]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁴⁹⁹ [A1]; [A3]; [C2]; [E6]; [H9] (AG4-2)

⁵⁰⁰ [H9] (AG4-2)

⁵⁰¹ [H9] (AG4-2)

⁵⁰² [H9] (AG4-2); [I1]

⁵⁰³ [C2]; [C5]; [E6]; [F3]

⁵⁰⁴ [A1]; [B1]; [E6]; [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-2)

⁵⁰⁵ [C2]; [H9] (AG4-2); [I1]

⁵⁰⁶ [C2]; [E4]; [E6]; [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-2); [I1]

⁵⁰⁷ [E6]

des Elektrolyten bei höheren Spannungen, Polymerbatterien und geschützte Li-Anoden zu nennen⁵⁰⁸. Der Forschungsbedarf zu diesen Themen in der Detailbewertung⁵⁰⁹:

Technologiethema	Forschungsbedarf
Li-Ionen-Technologie	hoch
Li-Schwefel	gering bis hoch
Post-Lithium (Metall/Luft, Metall/Schwefel)	hoch
Redox-Flow-Batterien	gering bis hoch
Natrium basierte Technologien (NaS und NaNiCl)	gering bis hoch
Neue Elektrolyte (z.B. ionische Flüssigkeiten, Solid State)	hoch
Recycling and Secondary Use	hoch
Supercaps	gering bis hoch
Elektromobilität: Laden, Batterie-Management, BoP	hoch

Die technologische Weiterentwicklung von Batterien und Batteriesystemen sei schon im laufenden Energieforschungsprogramm von 2011 enthalten und stehe auch künftig stark im Fokus. Weiterhin seien Themen der künftigen Forschung z.B. die Effizienzsteigerung⁵¹⁰, Leistungssteigerung⁵¹¹, Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte⁵¹², Lebensdauererhöhung⁵¹³, Verständnis der Alterungsmechanismen⁵¹⁴, neue Speichermaterialien⁵¹⁵, Verbesserung der Zuverlässigkeit, Qualität und Sicherheit⁵¹⁶ unterstützt durch Sensorik⁵¹⁷ sowie die Optimierung des Batteriemanagementsystems (BMS)⁵¹⁸ zusammen mit der Leistungselektronik⁵¹⁹. Im Bereich der Elektromobilität komme die Verbesserung der Reichweiten⁵²⁰ sowie die Schnelladefähigkeit hinzu⁵²¹. Allerdings vertreten einzelne Akteure auch die Einschätzung, dass Kurzzeit-Batteriespeicher tendenziell ausgereift seien und schwerpunktmäßig systemischer Verbesserungen bedürften⁵²².

Bei Redox-Flow-Batterien stünden die Entwicklung neuer Chemien, sowie die Verbesserung hinsichtlich Wirkungsgrad, Energiedichte, Leistungsdichte, Langzeitstabilität und verringerte Kosten sowohl für Redoxchemie als auch der Stacks im Vordergrund⁵²³. Deren wirtschaftliche Bedeutung sei hoch⁵²⁴.

⁵⁰⁸ [E4]

⁵⁰⁹ [I1]

⁵¹⁰ [C5]; [H9] (AG4-2)

⁵¹¹ [C2]; [E4]

⁵¹² [B2]

⁵¹³ [C2]; [H5] (AG4-3); [H9] (AG4-2)

⁵¹⁴ [H9] (AG4-2)

⁵¹⁵ [C5]; [E4]; [E6]

⁵¹⁶ [C2]; [C5]; [C9]; [H9] (AG4-2)

⁵¹⁷ [C2]; [C5]; [C9]; [H9] (AG4-2)

⁵¹⁸ [C9]; [E4]; [I1]

⁵¹⁹ [A3]; [C9]

⁵²⁰ [B2]

⁵²¹ [C9]; [E4]

⁵²² [D1]

⁵²³ [E4]; [H9] (AG4-2)

⁵²⁴ [C3]

Den Forschungsbedarf bei elektrischen Speichern, speziell Supercaps, schätzten die Akteure als gering bis hoch ein⁵²⁵. Sie weisen in diesem Kontext auf elektromagnetische und elektrostatische Direktspeicher bzw. Superkondensatoren (Supercaps) und supraleitende magnetische Energiespeicher⁵²⁶ hin. Die Kappung von Leistungsspitzen beim Stromverbrauch sei eine interessante Anwendung⁵²⁷.

Viele Akteure halten die Kostenreduktion bei Energiespeichern, insbesondere Batterien, immer noch für ein wichtiges Entwicklungsziel⁵²⁸. Dieses Ziel zu verfolgen, sei auf allen Forschungsebenen notwendig: Materialien bzw. Werkstoffe, Komponenten und bei Systemtechnik und Anlagen mit ihrer Peripherie, die zum Betrieb des Speichers notwendig seien⁵²⁹.

Ein weiteres hohes Potenzial zur Kostensenkung bestehe beim Fertigungsprozess. Herstellung und Produktion könnten durch Automatisierung kostengünstiger und durch intelligente Konzepte, z. B. Verfahren und Messtechnik, die Produktqualität verbessern⁵³⁰. Konkret schlagen die Akteure Schichtbildungs- und Abscheideverfahren sowie Prüfverfahren zur Qualitätssicherung vor⁵³¹. Weiterhin sollten neuartige Zell-, Modul- und Packdesigns sowie innovative Systeme zum Batteriemangement entwickelt werden⁵³².

Alle Themen rund um das Laden von Elektrofahrzeugen haben weiterhin eine große Bedeutung für die künftige Energieforschung⁵³³. Wichtiges Entwicklungsthema sei der Ausbau einer optimalen Ladeinfrastruktur⁵³⁴ sowie die Technik des Ladens selbst⁵³⁵. Hierzu gehörten: Ladeinfrastruktur, Ladebedarfe, Netzausbau⁵³⁶, Schnittstellen an Häusern und im Ortsnetz⁵³⁷, innovative Konzepte zur Steuerung und Regelung von Lastprofilen⁵³⁸ sowie kabelgebundene Lösungen für Nutz- und Sonderfahrzeuge, wie z. B. Oberleitungen⁵³⁹. Weitere Themen im Zusammenhang mit der Technik des Ladens seien: Systeme zum Batteriemangement⁵⁴⁰, Leistungselektronik⁵⁴¹, Schnellladefähigkeit⁵⁴², Alternativen zu CC-CV-Ladung⁵⁴³ und induktives und automatisiertes Laden⁵⁴⁴.

⁵²⁵ [I1]

⁵²⁶ [H8] (AG4-3); [I1]

⁵²⁷ [C5]

⁵²⁸ [A1]; [C4]; [C5]; [D1]; [E4]; [H9] (AG4-2)

⁵²⁹ [A1]; [A3]; [C4]; [C5]; [D1]; [E4]; [E6]; [H9] (AG4-2)

⁵³⁰ [C5]; [E4]; [E6]; [H9] (AG4-2)

⁵³¹ [E6]

⁵³² [E4]

⁵³³ [H9] (AG1-1/AG2-5); [I1]

⁵³⁴ [B2]; [F2]; [H9] (AG2-5)

⁵³⁵ [H9] (AG1-1/AG2-5); [I1]

⁵³⁶ [H9] (AG2-5)

⁵³⁷ [H9] (AG2-5)

⁵³⁸ [A1]; [A2]; [B1]; [H9] (AG2-5)

⁵³⁹ [A1]

⁵⁴⁰ [C9]; [E4] (BMS) [I1]

⁵⁴¹ [C9]

⁵⁴² [C9]; [E4]

⁵⁴³ [C9]

⁵⁴⁴ [A1]

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Viele Akteure verweisen bei den Hemmnissen für eine Markteinführung besonders auf die ungünstigen wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen und Regularien⁵⁴⁵. So fehlten z. B. Regelwerke zur Einbindung von Energiespeichern der Elektromobilität in die Stromnetze⁵⁴⁶. Diese könnten Thema eines Forschungsvorhabens zum Energiemarktdesign werden, um die Einschränkungen und Grenzen durch den bisherigen energiewirtschaftlichen Rahmen zu beziffern und Regeln für einen fairen Marktzugang von Speichern aufzuzeigen⁵⁴⁷. Die Belastung mit Steuern, Abgaben und Umlagen wird kritisiert⁵⁴⁸ und sollte klar geregelt werden⁵⁴⁹. Die Akteure empfehlen, Speicherstrom sowie Demonstrationsprojekte von Umlagen zu befreien⁵⁵⁰.

Hinzu komme die fehlende Standardisierung, die den Einsatz der Technologien hemme, da einheitliche Schnittstellen fehlten und Herstellerangaben mangels Standardtests wenig vergleichbar seien⁵⁵¹. Darüber hinaus müsse der Betrieb von Speichern wirtschaftlicher werden, um Markthürden zu überwinden⁵⁵². Ein weiteres Hemmnis für die Elektromobilität liege in der mangelnden Erzeugungs-, Netz- und Ladeinfrastruktur⁵⁵³. Die Bereiche Luftfahrt, Schwerlastverkehr und Schifffahrt können technologisch bedingt voraussichtlich nicht auf Elektromobilität umgestellt werden. In diesen Bereichen stehe eher die Bereitstellung von synthetischen Kraftstoffen aus Sonne und Wind im Vordergrund⁵⁵⁴.

Im Bereich der Entwicklung und Produktion von Batteriezellen und Materialien bestünden in Deutschland Lücken, wobei die Importabhängigkeit den Ausbau der Elektromobilität wie auch von stationären Energiespeichern behindere⁵⁵⁵. Auch die Rohstoffabhängigkeit sei ein Problem und könne in Zukunft zunehmend kritisch werden⁵⁵⁶. Folglich könnten Recycling und Second-Use⁵⁵⁷ und Technologien auf Basis alternativer Materialien⁵⁵⁸ die Abhängigkeit verringern und die Wertschöpfung in Deutschland steigern⁵⁵⁹.

⁵⁴⁵ [B2]; [C4]; [C8]; [C9]; [D1]; [H8] (AG 4-3); [H9] (AG 4-4)

⁵⁴⁶ [H9] (AG 4-2)

⁵⁴⁷ [A3]; [B2]; [C9]; [D1]; [H9] (AG 4-2)

⁵⁴⁸ [C9]

⁵⁴⁹ [C4]

⁵⁵⁰ [C9]

⁵⁵¹ [A3]; [H9] (AG4-2)

⁵⁵² [C5]; [H8] (AG4-4); [H9] (AG4-1/AG4-2)

⁵⁵³ [A1]; [D1]; [F2]

⁵⁵⁴ [F2]

⁵⁵⁵ [E6]; [F3]

⁵⁵⁶ [E4]; [E6]; [H2]

⁵⁵⁷ [A1]; [B2]; [E4]; [H1] (AG1-1); [H2]; [H8] (AG4-3); [H9] (AG4-2); [I1]

⁵⁵⁸ [E6]

⁵⁵⁹ [E6]; [F3]

3.17 Energiespeicher: Mechanisch, Power-Heat-Power

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Mit einer Kapazität von ca. 40 GWh seien Pump-, Druckluft- und Schwungmassenspeicher seit Jahrzehnten in Deutschland ein wichtiger Anker in der Stromwirtschaft. Diese Technologien seien auch weiterhin als geeignete Speichertechnologie anzusehen⁵⁶⁰. Während diese drei Technologien bereits ein hohes Maß an Reife und Marktdurchdringung aufwiesen, bestehe im Bereich der Strom-Wärme-Strom-Speicher, die im laufenden Energieforschungsprogramm bisher noch nicht gefördert wurden, ein bisher noch ungenutztes Potenzial, um Kapazitäten zu erschließen, die zwischen Kurz- und Langzeitspeicherung liegen⁵⁶¹.

□ Entwicklungsziele

In keiner der genannten Technologien bestehe grundlegender Forschungsbedarf⁵⁶².

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Akteure schätzen in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren die Integration in bestehende Energiesysteme, prototypische Versuchsumgebungen, Demonstration und „Reallabor“-Umsetzung als zielführend ein, um dem zunehmenden Anteil der erneuerbaren Energien bei gleichzeitiger Dekarbonisierung der Energieerzeugung zu begegnen. Als neuer Forschungsbereich kämen Strom-Wärme-Strom-Speicher hinzu, die als Schlüsseltechnologie zum Lückenschluss zwischen Kurz- und Langzeitspeichern bezeichnet werden. Hier bestehe das Risiko, dass internationale Akteure bereits die Marktreife anstrebten und somit Deutschland auf diesem Feld den Anschluss verliere⁵⁶³. Eine Übersicht der neuen Themen und der bisherigen Schwerpunkte von Forschung und Entwicklung, die fortgeführt werden sollen, zeigt die folgende Tabelle.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Power-to-Heat-to-Power als Brückenschlag zwischen Kurz- und Langzeitspeicherung 	<ul style="list-style-type: none"> • Pumpspeicher; Grundlagenforschung kann helfen, das Potenzial unterirdischer Pumpspeicher (z. B. stillgelegte Bergwerke) zu erschließen • hocheffiziente Druckluftspeicher, stehen erst am Anfang der Entwicklung – Stichwort: adiabater Prozess • Schwungradspeicher; Technologie zur Regelung und Stabilisierung der Stromnetze

⁵⁶⁰ [A5]; [C5]; [H8] (AG4/AG5); [I1]

⁵⁶¹ [A2]; [E6]; [F3]

⁵⁶² [I1]

⁵⁶³ [F3]

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Nach Meinung der Akteure bestünden aktuell für keine der Speichertechnologien auf Basis von Druckluft, Pumpspeicherung und Schwungmasse technologisch bedingte Markthürden, weil diese Technologien etabliert seien. Der hohe Flächenbedarf beim Bau neuer Pumpspeicherkraftwerke führe zu fehlender öffentlicher Akzeptanz und deutlicher Skepsis. Für diese Anlagen seien die Hemmnisse am größten⁵⁶⁴. Regulatorische Hemmnisse bei Projekten zur Speichererprobung in der Umgebung eines Reallabors sollte mithilfe von Experimentierklauseln ausgeräumt werden.

⁵⁶⁴ [11]

3.18 Energiespeicher: Thermisch und thermo-chemisch

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Bei der Umsetzung der Energiewende falle nach Ansicht vieler Akteure der Energiespeicherung eine zentrale Rolle zu. Wann immer möglich, solle Energie als Wärme statt als Strom gespeichert werden. Dies sei bis zu einem Faktor von 1.000 kostengünstiger. Die Nutzung des Erdreichs für die Klimatisierung von Gebäuden und technischen Anlagen erhalte zukünftig eine wachsende Bedeutung⁵⁶⁵, wobei Energiespeicher eine zentrale Rolle spielten. Gegenstand der Forschung seien chemische, elektrochemische, mechanische und thermische Speicher, bei denen sowohl technisch als auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit Fortschritte notwendig seien. Weiterer Forschungsbedarf bestehe bei der Integration von Energiespeichern in das Versorgungssystem⁵⁶⁶. Als Flexibilitätsoption seien Energiespeicher wichtig, allerdings adressiere die bisherige Speicherforschung nur eine eingeschränkte Anzahl an technologischen Optionen⁵⁶⁷.

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren schreiben die Akteure der Integration erneuerbarer Elektrizität aus Photovoltaik und Windenergie mithilfe von Energiespeichern eine zentrale Rolle zu. Dabei reichten die Einsatzmöglichkeiten von elektrischen Energiespeichern in Einfamilienhäusern mit PV-Anlage zur Steigerung des Eigenverbrauchs bis hin zu Großspeichern, um die Abregelung ganzer Windparks bei Überangebot zu vermeiden. Geeignete Speichertechnologien seien Batterien, Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicher, Flywheels, aber auch Power-to-Gas-Technologien. Thermische Speicher könnten dazu beitragen, negative Regelenergie für das Stromnetz bereitzustellen⁵⁶⁸. Damit ergebe sich eine Verbindung zum Gebäudebereich, bei dem die Wärmeversorgung im Mittelpunkt stehe. Dezentrale Speicherkonzepte zur Integration solarthermischer Wärme oder erneuerbarer Elektrizität aus PV und Wind könnten das fluktuierende Angebot dem Bedarf anpassen (Power-to-Heat). Elektrische und thermische Quartier- oder Schwarm Speicher seien in der Lage, durch intelligente Verknüpfung der Anbieter und Nutzer sowie durch Mehrfachnutzung der Speicherkapazitäten wirtschaftlich interessante Lösungen anzubieten. Als geeignete Speichertechnologien kämen hier sowohl elektrochemische Speicher als auch sensible, latente oder thermochemische Wärme- und Kältespeicher infrage⁵⁶⁹.

Im Bereich „Industrie und Gewerbe“ gehe es verstärkt um die Steigerung der Energieeffizienz. So könne z. B. durch den Einsatz thermischer Speicher industrielle Abwärme einer Nutzung zugeführt werden. Eine interessante Möglichkeit sei auch, Leistungsspitzen beim Stromverbrauch durch elektrische Speicher zu kappen, während die Bereitstellung von Strom und Wärme durch KWK-Anlagen mit Wärmespeichern effizienter gestaltet werden könne. Generell seien Speicheranwendungen in diesem Bereich attraktiv, weil die oft hohen Zyklenzahlen gute Amortisationsbedingungen böten. Die Akteure nennen thermische Speicher mit einem Fokus auf Hochtemperaturspeichern und dezentrale elektrische Speicher als geeignete Technologien⁵⁷⁰.

⁵⁶⁵ [C6]

⁵⁶⁶ [C2]; [E6]; [F2]; [G1]

⁵⁶⁷ [F2]

⁵⁶⁸ [C2]; [C5]; [F1]

⁵⁶⁹ [C5]; [G1]; [H1]; [H4]

⁵⁷⁰ [C5]; [F2]; [H4]

Energiespeicher seien ein Querschnittsthema der Energieforschung. So könne ein Batterie-Hausspeicher in Kombination mit einer PV-Anlage in einem Gebäude einen hohen Eigenverbrauch möglich machen und dabei als „Schwammspeicher“ das Netz durch Bereitstellung von Regelleistung entlasten. Ein großer Wärmespeicher, in ein Wärmenetz integriert, sei in der Lage, Abwärme aus industriellen Prozessen zur Gebäudeheizung bereitzustellen⁵⁷¹.

□ Entwicklungsziele

- Kostensenkung⁵⁷²
- Effizienzsteigerung⁵⁷³
- Steigerung der Zuverlässigkeit und Sicherheit⁵⁷⁴
- Wärme- und Kältespeicherung im Untergrund⁵⁷⁵
- Hochtemperaturwärmespeicher⁵⁷⁶
- Integration von Speicherlösungen in das Energiesystem der Zukunft⁵⁷⁷
- Systemsicherheit/Resilienz⁵⁷⁸
- IKT-Einbindung von dezentralen Erzeugern, Speichern und Lasten⁵⁷⁹
- Demonstration⁵⁸⁰
- Forschung zu Marktmodellen und zum Nachfrageverhalten⁵⁸¹

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Expertenempfehlungen und Positionspapiere zur thermischen und thermo-chemischen Energiespeicherung umfassen viele neue Forschungsbereiche, deren Aufnahme ins neue, 7. Energieforschungsprogramm die Akteure vorschlagen. Außerdem gebe es noch eine Reihe bewährter Förderthemen, die fortgeführt werden sollten. Beide sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

⁵⁷¹ [C5]

⁵⁷² [A1]; [B2]; [C5]; [E6]; [F3]; [H4]; [H8]

⁵⁷³ [C5]; [F3]; [H4]; [H8]

⁵⁷⁴ [C5]; [H8]

⁵⁷⁵ [C6]

⁵⁷⁶ [F2]; [H1]; [H2]; [H8]

⁵⁷⁷ [A1]; [C5]; [F3]; [H4]

⁵⁷⁸ [C7]

⁵⁷⁹ [C7]

⁵⁸⁰ [A1]; [A5]; [E6]; [H4]

⁵⁸¹ [F1]; [H4]; [H8]

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Integration von Speicherlösungen in das Energiesystem der Zukunft • Dezentrale kombinierte Strom-/Wärme-Speichersysteme einschließlich deren netzdienliche Systemintegration • Systemsicherheit/Resilienz • ITK-Einbindung von dezentralen Erzeugern, Speichern und Lasten • Demonstration, z. B. großskalige Wärmespeicher • Neue Wandlungs- und Speichertechnologien für die Energiewende: Entwicklung und Erprobung von bidirektionalen Wandlungs- und Speichertechnologien zwischen Strom und den Energieträgern Wärme/Kälte • Die Lade- und Entladedynamik der thermischen Speicher • Forschung zu Marktmodellen und zum Nachfrageverhalten, Verbrauchsmonitoring und Nutzerverhalten • Thermische Speicher im oberflächennahen Untergrund mit verbesserter Erkundung von geeigneten Speichern im urbanen Untergrund, Untersuchungen zu möglichen temperaturabhängigen mikrobiellen und chemischen Veränderungen und Konzepte zum Monitoring von Wärme- und Fluidveränderungen • Thermische Speicher im tieferen Untergrund: Weiterentwicklungen im Bereich der System- und Betriebsoptimierung, Wärmespeicherung in Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen, Installation von Demonstrationsanlagen • Entwicklungen von detaillierten Energiespeichermodellen für den Einsatz in systemanalytischen Betrachtungen eines zukünftigen Energiesystems, Untersuchungen mit höherer Auflösung, Quantifizierung des Potenzials dezentralen Speichereinsatzes mit Rückschlüssen auf einzelne Speichertechnologien 	<ul style="list-style-type: none"> • innovative Speichermaterialien (PCM, thermochemische Speichermaterialien), neue Speicherkonzepte und optimierte Komponenten • Kosten senken, Effizienz steigern, Zuverlässigkeit und Sicherheit erhöhen • Wärme- und Kältespeicher im Untergrund • Hochtemperaturwärmespeicher, insbesondere Feststoffspeicher, Flüssigsalzspeicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher für Temperaturen > 150 °C mit Aspekten in den Bereichen Material- und Komponentenentwicklung, Wärmetransport, Thermomechanik, Thermochemie und Systemintegration

Nach Ansicht der Akteure liegen die wichtigsten künftigen Forschungsfelder in der Integration erneuerbarer Energien/regenerativer Energiesysteme und in Energiespeichern. Mit diesen Themen werden also unmittelbar Umsetzungsfragen der Energiewende adressiert. Bei den Speicher-, Netz- und Integrationsaufgaben sollte nach Einschätzung der Autoren somit ein Schwerpunkt der Forschungsanstrengungen und der Forschungsförderung liegen⁵⁸². Dabei lägen die Speichertechnologien als einzelnes Forschungsthema an der Spitze. Systemfragen im Zusammenhang mit Speichern lägen an zweiter Stelle⁵⁸³. Dazu müssten innovative Speichermaterialien untersucht, neue Speicherkonzepte identifiziert und optimierte Komponenten entwickelt werden⁵⁸⁴. Darüber hinaus sei Forschung zu stationären Speichertechnologien, speziell für kostengünstige lange und sehr lange Speicherdauern wichtig. Diese dienten als Verschiebespeicher und saisonale Speicher, z. B., adiabatische Druckluftspeicher, Power-to-X und Latentwärmespeicher⁵⁸⁵. Großskalige Wärmespeicher vermögen aus Sicht der Akteure die Wärmewende voranzubringen⁵⁸⁶, während dezentrale kombinierte Strom-/Wärmespeichersysteme eine netzdienliche Systemintegration ermöglichen⁵⁸⁷.

In der praktischen Anwendung stelle sich die Frage, wie könnten Pools von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern zusammengestellt und im laufenden Betrieb reorganisiert werden? Diese wären in der Lage, den ökonomischen Gewinn oder andere Zielgrößen, wie z. B. die Vermeidung von Überlastungen der lokalen Netzinfrastruktur, effizient und zuverlässig zu optimieren. Ein weiteres Untersuchungsthema sei darüber hinaus, welche Anforderungen an die Erzeugungs- und Verbrauchsprognose sowie die IKT-Zuverlässigkeit zu stellen seien, um Systemdienstleistungen zu ermöglichen⁵⁸⁸. Eine solche Kopplung unterschiedlicher Energiequellen mit Speichern und intelligenten Netzen ist aus Sicht der Akteure für ein energieeffizientes und netzdienliches Gebäude unerlässlich⁵⁸⁹. Darüber hinaus seien für eine erfolgreiche Energiewende auch neue Wandlungs- und Speichertechnologien erforderlich. Dazu gehöre die Entwicklung und Erprobung von bidirektionalen Wandlungs- und Speichertechnologien zwischen Strom und den Energieträgern Wärme/Kälte, chemische Grundstoffe und Kraft-/Brennstoffe im MW-Maßstab⁵⁹⁰.

Weitere Forschungsschwerpunkte bestehen nach Ansicht der Akteure in der Betrachtung der Lade- und Entladedynamik thermischer Speicher, bei der Konzeptentwicklung und Integration sowie in der Entwicklung von Hochtemperaturspeichern – insbesondere Feststoffspeichern, Flüssigsalzspeichern, Latentwärmespeichern und thermochemischen Speichern für Temperaturen höher als 150 °C. Dabei seien Aspekte der Material- und Komponentenentwicklung, des Wärmetransports, der Thermo- mechanik und -chemie sowie der Systemintegration zu beachten⁵⁹¹.

Forschungsbedarf für Speicher im oberflächennahen Untergrund existiere bei der Erkundung von geeigneten Speichern im urbanen Umfeld, bei Untersuchungen zu möglichen temperaturabhängigen mikrobiellen oder chemischen Veränderungen und beim Monitoring von Wärme- und Fluidveränderungen. Um Speicher für den tieferen Untergrund zu optimieren, seien die System- und Betriebsoptimierung, die Wärmespeicherung in Kombination mit Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen

⁵⁸² [A1]; [A5]; [C2]; [F3]

⁵⁸³ [C2]; [F3]

⁵⁸⁴ [B2]; [C5]; [F2]; [H4]; [H8]

⁵⁸⁵ [E6]

⁵⁸⁶ [A1]; [F3]

⁵⁸⁷ [B2]; [F3]; [H4]; [H8]

⁵⁸⁸ [C7]

⁵⁸⁹ [H4]

⁵⁹⁰ [H4]; [F3]

⁵⁹¹ [H8]

sowie bei der Installation von Demonstrationsanlagen notwendig⁵⁹². Energiespeicherung müsse als zentrale Komponente des zukünftigen Energiesystems in allen Bereichen verortet sein⁵⁹³.

Forschungsbedarf bestehe darüber hinaus auch zu Märkten und Marktteilnehmern. Ein wichtiger Ausgangspunkt dabei sei, dass ein großer Teil des Energieverbrauchs auf die privaten Haushalte entfalle. Für sie bestehe die Möglichkeit, durch den Einsatz effizienterer Technik und ein geändertes Verhalten ihren Energieverbrauch zu senken oder stärker auf das Angebot auszurichten. Unterstützen könnten dies Maßnahmen, die Endverbraucher besser über den eigenen Verbrauch informierten, oder andere Anreize zum Energiesparen eröffneten. Um Verbraucherverhalten wissenschaftlich zu analysieren, fehle es allerdings häufig an Daten. Um diesen Mangel zu beheben, sollten etwa Daten zum Energieverbrauch von Privathaushalten fortlaufend erhoben und dokumentiert werden. Auch die wissenschaftliche Begleitung von Prozessen der Markteinführung könne ein besseres Verständnis für die Entwicklung des Verbraucherverhaltens ermöglichen. Auf Grundlage der erhobenen Daten ließen sich energiepolitische Maßnahmen evaluieren, etwa Energieeffizienzstandards im Gebäudebereich, Preisanreize und weitere verhaltensökonomisch fundierte Maßnahmen, z. B. sogenannten „Nudges“⁵⁹⁴.

Systematische Betrachtungen des zukünftigen Energiesystems seien häufig von vereinfachenden Annahmen geprägt, die den Nutzen von Energiespeichern nicht erkennen ließen. So träten viele der möglichen Einsatzbereiche für Speicher gar nicht zutage, da in den Untersuchungen ein „perfektes“ Energiesystem unterstellt werde⁵⁹⁵. Es sei deshalb wünschenswert, Analysen mit höherer Auflösung durchzuführen, die sowohl das Potenzial dezentralen Speichereinsatzes quantifizieren als auch Rückschlüsse auf einzelne Speichertechnologien erlaubten. Dabei seien alle Speichertechnologien zu berücksichtigen⁵⁹⁶.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Bedeutung verlässlicher energiepolitischer Rahmenbedingungen zeige sich gerade bei Energiespeichern, so die Meinung der Akteure. So bestünden derzeit Unklarheiten über die künftige Belastung des Speicherbetriebs mit Steuern, Abgaben und Umlagen. Das führe zu einer Verunsicherung potenzieller Speicherbetreiber und verhindere Forschungsaktivitäten. Der Abbau regulatorischer Hemmnisse sowie geeignete wettbewerbliche Standortbedingungen werden folglich als Voraussetzung gesehen, um die Speichertechnologien weiterzuentwickeln⁵⁹⁷.

Eine sich ergänzende Einbindung unterschiedlicher Erzeugereinheiten zur Energiebereitstellung sowie von Wärmequellen und -senken auf verschiedenen Temperaturniveaus in die Gebäudesystemtechnik biete die Möglichkeit für deutliche Einsparungen von Primärenergie. Dies setze eine intelligente Kopplung der Untereinheiten zu einem übergeordneten Gesamtsystem inklusive der effizienten Anlagenverschaltung zur bedarfsgerechten Versorgung voraus. Besondere Anforderungen seien an die Verknüpfung der Untereinheiten im Hinblick auf Planungs-, Ausführungs- und Betriebsprozesse zu stellen⁵⁹⁸.

⁵⁹² [C6]; [E6]

⁵⁹³ [C5]

⁵⁹⁴ [F1]; [H8]

⁵⁹⁵ [C5]

⁵⁹⁶ [C5]; [F1]; [F3]

⁵⁹⁷ [C2]

⁵⁹⁸ [H4]

3.19 Wasserstoffherzeugung und -speicherung, inklusive geologischer Speicher

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Vertreter aus den Bundesländern sowie von Wirtschaft und Wissenschaft schätzen im Rahmen des Konsultationsprozesses den Forschungsbedarf zu Speichern und ihren Beitrag zum Erfolg der Energiewende gleichermaßen als äußerst wichtig ein⁵⁹⁹. Aufgrund der internationalen Bedeutung sei darüber hinaus das Feld „Power-to-H₂/Gas/Fuel/Chem“ innerhalb der Sektorkopplung hervorzuheben⁶⁰⁰. Hier solle Deutschland – auch mit Blick auf zukünftige weltweite Entwicklungen – den heimischen Produktionsstandort und die erreichte Technologieführerschaft in Power-to-Wasserstoff für das Energiesystem der Zukunft verteidigen und ausbauen⁶⁰¹.

Um den Klimaschutzplan 2050 zu erfüllen, sei es notwendig, eine strombasierte Wasserstofftechnik mit Elektrolyse als Voraussetzung für diese Schlüsseltechnologie der chemischen Industrie bei der CO₂-Nutzung wirtschaftlich umzusetzen⁶⁰². Die Umwandlung des Wasserstoffs in synthetische Gase oder synthetische Kraftstoffe sowie der direkte Einsatz zur Wärmeerzeugung und bei Fahrzeugantrieben könne erheblich zur Dekarbonisierung beitragen. Das erfordere eine Markteinführung im TWh-Bereich⁶⁰³. Auch die Wirtschaftlichkeit der Leistungsregelung von Großkraftwerken ließe sich gegebenenfalls durch Tri-Generation (Strom, Wärme und Wasserstoff) verbessern⁶⁰⁴. Parallel zur Notwendigkeit von Großanlagen sei auch ein Trend zur Dezentralisierung und teilweise auch zur Energieautonomie auf Basis einer Wasserstoffnutzung erkennbar⁶⁰⁵.

Wasserstoff könne als stationärer zentraler oder dezentraler Langzeitspeicher für überschüssige regenerative Energien und als cross-sektoraler Systemintegrator für zahlreiche Anwendungsgebiete dienen. Daher müsse das gasförmige Speichermedium mit innovativen, kostenoptimierten, effizienten und skalierbaren Power-to-X-Konzepten, z. B. Wasserelektrolyse/Fischer-Tropsch-Synthese, die Energiewende besonders in Metropolen mitprägen⁶⁰⁶. Die Erforschung der Basistechnologien der Wasserelektrolyse in Form von Reallaboren, die in adäquate Infrastrukturen einzubinden seien, habe eine große Relevanz⁶⁰⁷. Darüber hinaus habe die Langzeitspeicherung von Wasserstoff in geologischen Formationen eine hohe Bedeutung für ein zukünftiges Energiesystem⁶⁰⁸, um „Dunkelflauten“ überbrücken zu können⁶⁰⁹. Der geologische Untergrund sei derzeit die einzige bekannte Option zur Langzeitspeicherung großer Mengen fluktuierender Energiemengen⁶¹⁰, wodurch sich beispielsweise eine Abregelung von Windparks vermeiden lasse⁶¹¹. Die Wasserstoffspeicherung in flüssiger (LOHC)

⁵⁹⁹ [I1]

⁶⁰⁰ [F2]; [H10]

⁶⁰¹ [A1]; [A3]

⁶⁰² [E3]

⁶⁰³ [A3]; [C4]; [C8]; [C9]; [F3]; [H8]

⁶⁰⁴ [A1]; [H9]

⁶⁰⁵ [H10]

⁶⁰⁶ [B2]; [C9]; [E6]; [H9]

⁶⁰⁷ [A3]; [H8]

⁶⁰⁸ [A2]; [H8]

⁶⁰⁹ [F3]

⁶¹⁰ [F3]

⁶¹¹ [A3]; [B2]

oder fester Form (Metallhydride) eröffne vielfältige zusätzliche Möglichkeiten, Wasserstoff zu speichern, zu transportieren und einzusetzen⁶¹².

Wie bei anderen Zukunftstechnologien auch, seien bei Power-to-Gas Produktionsprozesse, Infrastruktur und multimodale Märkte entscheidende Faktoren für den Erfolg der Technologie. Für eine ganzheitliche und vergleichende Bewertung sei es erforderlich, umfangreiche Datensätze zu erheben und zu analysieren⁶¹³. Gleichfalls sei die digitalisierte Vernetzung von Langzeitspeichern ein wichtiges Thema im Bereich der Smart Grids⁶¹⁴. Um der Technologie zur erfolgreichen Markteinführung zu verhelfen, seien rechtzeitig Maßnahmen zu ergreifen, die die Partizipation der Gesellschaft sicherstellen und zur Akzeptanz beitragen. Dies gelte insbesondere im Umgang mit Daten und darauf basierenden neuen, den Energiemarkt und die Gesellschaft beeinflussenden Geschäftsmodellen⁶¹⁵.

Bei den aktuellen Regularien und politischen Determinierungen bestünden Defizite, die nach Ansicht der Akteure die strategische Weiterentwicklung und die Erschließung bislang ungenutzter Flexibilitätspotenziale erschweren. Dadurch fehle darüber hinaus ein adäquater Rahmen für zukunftsweisende Investitionsentscheidungen und Geschäftsmodelle⁶¹⁶.

□ Entwicklungsziele

- Entwicklung der strombasierten Wasserelektrolyse als Grundlage zur Kopplung der Stromwirtschaft mit anderen Sektoren und für eine dekarbonisierte Mobilität und Logistik in Metropolregionen⁶¹⁷
- Sektorale Vernetzung auf Basis einer durchgehenden Digitalisierung (Big Data) zur ganzheitlichen Bewertung des Einsatzes der speziellen Wasserstoffflexibilität im bestehenden Energiesystem⁶¹⁸
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Großkraftwerken durch Tri-Generation (Strom, Wärme und Wasserstoff)⁶¹⁹
- Wirtschaftliche Herstellung hoher Kapazitäten von synthetischen Kraftstoffen auf der Basis von H₂ und CO₂⁶²⁰
- Leuchtturm-Projekte der industriellen Wasserstofferzeugung aus Elektrolyse zur Nutzung in der Chemieindustrie⁶²¹
- Anpassung des Marktdesigns im Sinne einer langfristigen präqualifizierenden Vision⁶²², die durch pränormative Forschung unterstützt werde⁶²³
- Einrichtung eines nationalen Forschungskonsortiums Sektorenkopplung zur Integration dieser Technologie in ein künftiges regionales Versorgungssystem einer Modellstadt zur Herstellung, Transport und Speicherung von Wasserstoff⁶²⁴

⁶¹² [C9]; [H9]

⁶¹³ [A3]; [H9]

⁶¹⁴ [A2]

⁶¹⁵ [A3]; [E7]; [H8]

⁶¹⁶ [A3]; [C9]; [E2]; [F1]

⁶¹⁷ [A3]; [B2]; [H8]

⁶¹⁸ [A2]; [A3]; [H9]

⁶¹⁹ [A1]

⁶²⁰ [A3]; [D1]

⁶²¹ [C8]

⁶²² [A2]; [E6]

⁶²³ [E6]

- Schaffung einer einheitlichen und umfassenden Pilot-Infrastruktur inklusive Untertage-
speicherung bis 2025⁶²⁵
- Optimierung von Materialien, Komponenten und Systemtechnologien an Pilotanlagen⁶²⁶
und Generierung von Langzeiterfahrungen⁶²⁷
- Spezifische Förderung von Großelektrolyseuren zur Markteinführung wirtschaftlicher
Anlagen in der Leistungsklasse > 10 MW⁶²⁸
- Unterstützung technologierelevanter Start-ups bei der Markteinführung und -
gestaltung⁶²⁹
- Reduktion von Investitions- (CAPEX) und Betriebskosten (OPEX) durch optimierte Kon-
zepte und Prozesse⁶³⁰
- Durchführung internationaler Partnerprojekte in Reallaboren aufgrund eines erfolgrei-
chen Technologieexports⁶³¹
- Entwicklung dezentraler Anlagen für Wohn- oder Industriegebäude mit kleinen Mittel-
druckspeichern als Ergänzung des benötigten Portfolio⁶³²
- Schaffung partizipativer Akzeptanz der Wasserstofftechnologie in der Gesellschaft⁶³³
- Sicherung der technischen und ökonomischen Erfolge der Wasserstoffherstellung durch
eine systemanalytische Begleitforschung⁶³⁴

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

In der folgenden Übersicht sind neue Forschungsthemen für das 7. Energieforschungsprogramm und Förderbereiche, die aus Sicht der Akteure auf der Basis des laufenden Programms weitergeführt und aktualisiert werden sollten, zusammenfassend dargestellt.

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energie- forschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungs- programms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Reallabore: Große sektorgekoppelte De- monstratoren und Pilotanlagen der Wasser- elektrolyse und Aufbau einer Forschungska- verne • Sektorkopplung: Regenerativer Wasserstoff als tragendes Element in der Netzregulie- rung und Langzeitenergiespeicher • Regulatorischer Rahmen: Praxisorientierte Anpassung zur wirtschaftlichen Betreibung von Elektrolyseanlagen 	<p><u>Steht explizit zum Thema „Wasserstoff“ im 6. Energieforschungsprogramm und in den Posi- tionspapieren:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Speicherung von TWh durch Wasserstoffpro- duktion • Scale-up der PEM-Elektrolyse in den MW- Bereich • Weiterentwicklung und sektorunabhängige Anwendung funktionsfähiger fester Wasser-

⁶²⁴ [B1]; [C2]; [C4]; [E2]; [F2]; [F3]

⁶²⁵ [A2]; [A3]; [B1]; [C2]; [F3]; [H9]

⁶²⁶ [E6]

⁶²⁷ [H10]

⁶²⁸ [A3]; [C2]; [E2]

⁶²⁹ [A3]; [F1]

⁶³⁰ [H10]

⁶³¹ [A3]; [F1]

⁶³² [H10]

⁶³³ [A1]; [A3]

⁶³⁴ [H8]

<ul style="list-style-type: none"> • Wasserstoffwirtschaft: - Entwicklung einer flächendeckenden Elektrolysewasserstoff-Infrastruktur - Demonstration spezifischer Geschäftsmodelle im Strommarkt - Aktives Marktdesign für alle Power-to-X Märkte • Big Data: Marktmodale Einbindung der Wasserstoffelektrolyse in den fluktuierenden Energiemarkt • Produktionsverfahren: Innovativ optimierte, und serientaugliche Prozesse für großskalige Elektrolyseure • Standardisierung und Normung von Bauteilen und Prozessen für Elektrolyseure • Materialien: Neue Möglichkeiten durch u.a. organische Flüssigkeiten (LOHC) • Partizipationsforschung: sofortige Einbeziehung privater Interessensvertretungen 	<p>stoffspeicher (Metallhydride)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Wasserstoff-Versorgungsstationen bzw. Logistik-/Infrastruktursystemen <p><u>Steht im 6. Energieforschungsprogramm im allgemeinen Teil oder im Kontext mit Brennstoffzellen. In den Positionspapieren jetzt dem Thema „Wasserstoff“ zugeordnet:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Standardisierung und Serienproduktion für Brennstoffzellen (relevant bei überschneidenden Bauteilen oder Prozessen zum reversen Prozess der Elektrolyse) • Effizienz und Kostenreduktion in der Produktionsforschung • Forschung an Material, Komponenten, Systemen: Lebensdauer und Kosten verbessern • Betriebsparameter flexibilisieren (intermittierende Elektrolyse) • Weitere Festigung des Vorsprungs Deutschlands auf dem Gebiet der Energieforschung im internationalen Vergleich zur Stärkung des Exports • Alternative Speichermaterialien in alle Richtungen • Weiterhin hoher allgemeiner Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei geologischen Untergrundspeichern • Systemanalyse zu: <ul style="list-style-type: none"> - Umgestaltung des Energiesystems (Akzeptanzforschung) - Energieeffizienz - Sektoren und deren Infrastruktur - Regulatorischer Rahmen im vernetzten Energiesystem • Entwicklung von IKT zur Netzregulierung
--	--

Viele Akteure bezeichnen in ihren Expertenempfehlungen und Positionspapieren den Bedarf an künftiger Forschung und Entwicklung für das Thema Wasserstofferzeugung und -speicherung als eher allgemein bekannt und als eine Fortführung bisheriger Aktivitäten. Für alle Power-to-X Technologien und die strombasierte Elektrolyse bestehe vielfältiger Forschungsbedarf⁶³⁵. Ferner seien die technologischen Optionen zur Speicherforschung, wie Konzepte, Systemtechnologien, Prozesse, Komponenten

⁶³⁵ [A3]; [C4]; [H8]

ten, Materialien⁶³⁶, zu Wirkungsgraden und Leistungsdichten, zu CAPEX und OPEX⁶³⁷, zu Betriebsführungen und Businessmodellen⁶³⁸ und zur Produktqualität auszuloten⁶³⁹.

Darüber hinaus fordern die Akteure eine Fokussierung der Forschung auf energiemarktnahe und übergeordnete systemische Schlüsselthemen. Dies gelte für die Infrastruktur einer Wasserstoffwirtschaft – insbesondere das Leitungsnetz⁶⁴⁰, die Systemintegration der Wasserstofferzeugung (Sektor-kopplung)⁶⁴¹, die wirtschaftlichen Überführung der Wasserelektrolyse in den industriellen Maßstab⁶⁴², die digitale Vernetzung⁶⁴³ und die dazu nötigen Versuchsplattformen und Pilotanlagen⁶⁴⁴. Bei den Letztgenannten seien Reallabore die geeigneten Instrumente, um grundlegende interdisziplinäre Forschung zu den o.g. Fragestellungen in markteingebundener Art und Weise durchzuführen⁶⁴⁵. Dies erlaube eine valide Optimierung von Prozessen, wie dem wichtigen und weiter zu integrierenden Fischer-Tropsch-Verfahren⁶⁴⁶, neuen bidirektionalen Wandlungstechnologien⁶⁴⁷ sowie der Vorabforschung auf dem Gebiet der Standardisierung und Normierung⁶⁴⁸. Weiterhin ermögliche dies die praxisnahe Erforschung und Gestaltung neuer Marktdesigns und Geschäftsmodelle mit dem zu erreichenden Verständnis des Gesamtprozesses mit allen technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Zusammenhängen⁶⁴⁹. Modellierungsansätze anhand von virtuellen als auch realen Laboren sollen nach Ansicht der Akteure verstärkt angewendet werden, um Konzepte und alternative Infrastrukturen zur Speicherung und Verteilung ganzheitlich und systemisch mit dem Ziel einer synergetischen Optimierung zu betrachten⁶⁵⁰. Analysen des Betriebs und der Wirtschaftlichkeit verschiedener Konzepte, z. B. Skalierung, dezentral versus zentral, Kopplung von Elektrolyse mit Stoffwandlungsprozessen, sowie Sicherheitsanalysen und -anforderungen nähmen darüber hinaus einen zentralen Platz ein⁶⁵¹.

Ein weiteres Ziel sei die Demonstration eines neuen Energiesystems durch weiterentwickelte großtechnische Anlagen im Feldversuch⁶⁵². Dazu werden auch Arbeiten an neuen, bisher noch nicht in der Forschungsförderung adressierten Konzepten, Materialien und Technologien empfohlen⁶⁵³. Ebenso seien vermehrt großskalige Produktions- und Herstellungsverfahren und dahinterliegende Prozesse als technologieentscheidende Faktoren weiterzuentwickeln bzw. hinsichtlich Effizienz und Kosten zu optimieren⁶⁵⁴.

⁶³⁶ [B1]; [B2]; [E6]; [F2]; [H10]

⁶³⁷ [C9]; [H9]; [H10]

⁶³⁸ [A1]; [A3]; [E6]

⁶³⁹ [H10]

⁶⁴⁰ [B1]; [C2]; [E2]; [F2]

⁶⁴¹ [A2]; [A3]; [C4]; [F2]

⁶⁴² [C2]

⁶⁴³ [A1]; [A2]; [B2]; [E7]

⁶⁴⁴ [C8]; [E2]

⁶⁴⁵ [B2]; [E6]

⁶⁴⁶ [A3]; [B2]

⁶⁴⁷ [F3]

⁶⁴⁸ [B2]; [E6]

⁶⁴⁹ [A2]

⁶⁵⁰ [F2]; [H9]

⁶⁵¹ [H8]

⁶⁵² [F2]; [H9]

⁶⁵³ [F2]

⁶⁵⁴ [H9]

Um neue Einsatzmöglichkeiten zu analysieren sei es erforderlich, Systemkonzepte zu verbessern, Rahmenbedingungen für die Netzintegration zu prüfen und Empfehlungen auszusprechen sowie Ideen zur Erforschung neuartiger sektorkoppelnder Hybridkonzepte zu entwickeln und Optimierungsparameter aufzuzeigen. Nach Ansicht der Akteure ließe sich damit die Verbreitung der strombasierten Elektrolyse beschleunigen. Ein weiterer künftiger Forschungsschwerpunkt liege in der Analyse der Einsatzoptionen, den Anforderungen an Elektrolyseure und deren Produkte sowie deren Demonstration und Einbindung in das Energiesystem⁶⁵⁵. Hinzu komme ein technisch und volkswirtschaftlich optimierendes Energiemarkt- und netzdesign, das die ganzheitliche Bewertung der Wasserstoffflexibilität im Stromnetz aufgrund von permanent erhobenen, zusammengeführten Datensätzen ermögliche⁶⁵⁶. Dabei sei parallel die Resilienz datengestützter Infrastrukturen gegenüber Angriffen von außen zu sichern⁶⁵⁷. Dies sei aus Sicht der Akteure nur mit einer spezifischen Begleitforschung erfolgreich umzusetzen⁶⁵⁸, wobei die genannten systemischen Forschungsziele bis 2025 erreicht werden sollten⁶⁵⁹.

Im Hinblick auf die technologischen Herausforderungen existiere folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf: Performance-, Dynamik- und Lebensdaueruntersuchung stünden weiterhin im Fokus, wobei diese durch Modellierungsarbeiten begleitet werden sollten. Hinzu käme die Stackforschung zu Effizienz, Leistungsdichte, Skalierung, Kostenreduktion, Degradationsverhalten sowie dem dynamischem Betrieb bei der PEM-Elektrolyse⁶⁶⁰ und der alkalischen Elektrolyse. Darüber hinaus wird insbesondere die Weiterentwicklung der Hochtemperatur-Elektrolyse (SOE) und der Co-Elektrolyse (HT-Werkstoffe und Fügetechnologien; Protonenleiter für SOE) explizit genannt. Auf der Betriebsführungsebene falle der Druck- und Hochdruck-Elektrolyse und der Hybridisierung von Elektrolyseuren mit anderen Speichertechnologien eine besondere Bedeutung zu. Als relativ neues Feld der strombasierten Wasserstoffherstellung komme die Meerwasserelektrolyse hinzu⁶⁶¹.

Über die Art und Weise, wie der regenerativ erzeugte Wasserstoff gespeichert und transportiert werden kann, eröffnen sich neue Möglichkeiten einer sicheren, effizienten und einfachen Nutzung: Zu diesem Thema schätzen die Akteure die Entwicklung so ein, dass der Neuentwicklung und Optimierung von innovativen chemischen Materialien, wie insbesondere der LOHC-Technologie (Liquid Organic Hydrogen Carrier) und der Metallhydride, eine tragende Rolle in einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft zufalle⁶⁶².

Im Bereich der geologischen Speicher ist das am häufigsten genannte Ziel für das Erreichen der Wirtschaftlichkeit strombasierter Wasserstofftechnik die Realisierung einer Forschungskaverne als Großspeicher für Wasserstoff⁶⁶³. Des Weiteren sollten vorhandene Kavernenspeicher für die Wasserstoffspeicherung ertüchtigt werden⁶⁶⁴. Außerdem empfehlen die Akteure, neue Konzepte für die

⁶⁵⁵ [H8]

⁶⁵⁶ [H9]

⁶⁵⁷ [A3]

⁶⁵⁸ [H8]

⁶⁵⁹ [H9]

⁶⁶⁰ [I1]

⁶⁶¹ [H8]

⁶⁶² [C9]; [H9]; [H10]

⁶⁶³ [B1]; [C2]; [E2]; [E3]

⁶⁶⁴ [H9]

Speicherung von (u. a.) Wasserstoff in Salzkavernen oder Porenspeichern („poröse Medien“)⁶⁶⁵ sowie weitere Nutzungskonzepte⁶⁶⁶ zu erforschen. Hinzu komme das akute Feld der Akzeptanzforschung im Bereich Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -wirtschaft⁶⁶⁷.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Bei einer in der Energietechnik und -wirtschaft kontrovers geführte Diskussion geht es im Kern um folgende Frage: Deutet der Wirkungsgrad und damit die Wirtschaftlichkeit von Power-to-Gas im Vergleich zu Power-to-Heat auf eine niedrigere technologische Effektivität und ökonomische Effizienz hin?⁶⁶⁸ Der Mehrwert von Power-to-Hydrogen basiere folglich auf der einzigartigen Kopplungsmöglichkeit über alle Sektoren. Unter diesem Aspekt seien auch die zukünftigen technologischen Herausforderungen zu sehen. Einerseits soll die Forschung zu neuen Materialien für die Speicherung des Wasserstoffs⁶⁶⁹ zu optimierten Betriebsführungen und verbesserten Produktionsverfahren fortgesetzt werden, um weiterhin zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung beizutragen. Andererseits sei die Elektrolyse an und für sich bereits einsatzbereit für den Markt. Als eigentliche Hürde gelte die jetzt anstehende Großdemonstration in Reallaboren zur Sammlung von Langzeitdaten⁶⁷⁰, bei der Bund und Länder durch die Förderung entsprechender Versuchsplattformen zur wirtschaftlichen Marktreife beitragen sollten⁶⁷¹. Geeignete Leuchtturmprojekte bedürften dabei einer regionalspezifischen Ausgestaltung⁶⁷². Groß angelegte Vorhaben zur Wasserstoffwirtschaft müssten über die komplette Wertschöpfungskette geplant und dargestellt werden⁶⁷³. Neben den rein technischen Aspekten der Laufzeiten und Wartungsintervalle in der Praxis erfordere eine stetig zunehmende Komplexität dann auch zusätzlich ein Verständnis des Gesamtprozesses mit allen technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Zusammenhängen. So lasse sich der energiewirtschaftliche Ordnungsrahmen und das entsprechende Marktdesign weiterentwickeln⁶⁷⁴. Die Herausforderung liege darin, dass Wirtschaftlichkeitsanalysen, Ausarbeitung wirtschaftlicher Anwendungen, Businessmodelle, Geschäftsmodellforschung sowie eine verstärkte Förderung von Standardisierungs- und Normungsaktivitäten (Pränormative Forschung) dabei von herausragender Präqualifikation für einen Erfolg der Wasserstoffwirtschaft seien. Deshalb falle ihnen eine große Priorität zu⁶⁷⁵. Rein technisch gesehen seien dabei für Power-to-Gas Anlagen erst einmal hinreichende Anreize für systemdienliche/systemkostenreduzierende Fahrweisen und Lastgänge zu schaffen⁶⁷⁶. Bei der Einbindung in die chemische Industrie liege der Vorteil und eine Anforderung darin, im gegenseitigen Wechselspiel der optimierten Verfahren kontinuierliche Chemieprozesse zu flexibilisieren⁶⁷⁷.

Um diese Ziele zu erreichen, erfordere die regenerative Wasserstoffherstellung auch eine digitale standardisierte Infrastruktur in der sektoralen Vernetzung. Auch die Nutzung zusammengeführter

⁶⁶⁵ [F3]

⁶⁶⁶ [B1]

⁶⁶⁷ [A1]

⁶⁶⁸ [D1]

⁶⁶⁹ [F2]

⁶⁷⁰ [F3]

⁶⁷¹ [E2]

⁶⁷² [C8]

⁶⁷³ [H10]

⁶⁷⁴ [A2]; [B2]

⁶⁷⁵ [A3]; [E6]

⁶⁷⁶ [A3]

⁶⁷⁷ [C9]

Datenbestände (Big Data) gehöre dazu⁶⁷⁸. Eine hier zu erreichende hohe Resilienz solcher IKT- vernetzter Systeme gegenüber Hackerangriffen sei kritisch⁶⁷⁹. Aber auch das Wasserstoffleitungsnetz und die komplette Infrastruktur einer Wasserstoffwirtschaft zur Versorgung mit z. B. synthetischen Kraftstoffen müsse überarbeitet und aufgebaut werden⁶⁸⁰. Dies führe zu einem kritischen logistischen Impact. Zum Abbau von wirtschaftlichen Risiken und Markthürden fordern die Akteure mit Nachdruck, eine spezifische Förderung von Demonstrationsanlagen im Bereich der geologischen Kavernenspeicher⁶⁸¹.

Eine möglichst frühzeitig zu beachtende und zu bearbeitende Grundvoraussetzung sei die Akzeptanz in der Gesellschaft. Dies gelte besonders bei einem Thema wie Wasserstoff. Um diese zu erreichen, sei eine ausreichende Partizipation notwendig⁶⁸². Energiemarkt- und Netzdesign müssten dafür volkswirtschaftlich optimiert ausgelegt werden⁶⁸³. Auch dürfe nicht übersehen werden, dass noch interdisziplinäre Ausbildungsberufe fehlten, die die Basis eines zukünftigen Einsatzes dieser Technologie bildeten, und es noch an der dafür notwendigen Bildungsinfrastruktur in weiten Teilen mangelte⁶⁸⁴.

Abschließend sei nochmals die zu Beginn dieses Kapitels erhobene Forderung der Energiewirtschaft nach einer Abänderung des regulatorischen Umfelds erwähnt. Aufgrund politischer Determinierung könnten bisher keine wirtschaftlichen Geschäftsmodelle für die GroBelektrolyse und die damit verbundene Wasserstoffwirtschaft entwickelt werden. Eine Entlastung von Steuern, Netzentgelten und anderen Abgaben, z. B. im Rahmen der Experimentierklausel, sowie eine neue preisliche Bewertung von CO₂-Emissionen seien zwingend notwendig, um überhaupt Anreize für strategische und zukunftsweisende Investitionsentscheidungen und neue Geschäftsmodelle zu treffen. Diese seien nötig, um im internationalen Wettbewerb zu bestehen⁶⁸⁵. Auch hier gelte die Notwendigkeit, zur Markteinführung neuer Technologien die relevanten Start-ups durch eine spezielle staatliche Förderung zu unterstützen⁶⁸⁶.

⁶⁷⁸ [A1]; [A2]; [A3]; [B2]; [E7]; [H9]

⁶⁷⁹ [A3]

⁶⁸⁰ [B1]; [E2]; [H10]

⁶⁸¹ [C2]; [E2]

⁶⁸² [A1]; [A3]; [E7]

⁶⁸³ [H9]

⁶⁸⁴ [F1]

⁶⁸⁵ [A1]; [A3]; [C2]; [C4]; [C8]; [C9]; [E2]; [E7]; [F1]; [F2]; [F3]

⁶⁸⁶ [A3]; [F1]

3.20 Sektorkopplung: Power-to-Gas, Power-to-Heat, Power-to-Liquids, Power-to-Chemicals

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In den Expertenempfehlungen und Positionspapieren halten es die Akteure für erforderlich, über den Stromsektor hinaus die Sektoren Verkehr und Wärme weitgehend zu dekarbonisieren, um die politischen Zielvorgaben zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland um 80 – 95 % bis zum Jahr 2050 zu erreichen⁶⁸⁷. Daher seien die Entwicklung von Power-to-X Technologien und die Erzeugung und Nutzung synthetischer Kraftstoffe, mit denen die Sektorkopplung technologisch umgesetzt wird, ein zentraler Schwerpunkt für die zukünftige Energieforschung⁶⁸⁸. Die Kopplung der Sektoren Industrie, Verkehr, Wärme und Landwirtschaft ermögliche einen Ausstieg aus nicht nachhaltigen Strukturen⁶⁸⁹, indem Kohlenstoffkreisläufe geschlossen würden⁶⁹⁰.

Die strombasierte Erzeugung alternativer Kraftstoffe ermögliche international einen räumlichen Ausgleich zwischen Erzeugung und Nutzung, da die Erzeugung im globalen Süden vorteilhaft sein könne und sich Kraftstoffe sehr gut transportieren ließen⁶⁹¹. Auch an anderer Stelle empfehlen die Akteure, internationale Strategien zum Klimaschutz und den Export in der Energieforschung stärker zu berücksichtigen⁶⁹². Bei der Dekarbonisierung des Verkehrs gehe es um Konzepte für den Straßen-, Schiffs- und Luftverkehr⁶⁹³, wodurch auch lokal ein Beitrag zur Luftreinhaltung geleistet werden könne⁶⁹⁴.

Zusätzlich zu den Vorteilen der Sektorkopplung für den Klimaschutz biete er außerdem ein großes Potenzial zur Flexibilisierung des Energiesystems⁶⁹⁵. Durch die optimale Verknüpfung heute getrennter Infrastrukturen für Elektrizität, Kraftstoffe, Gase usw. ließen sich Synergien beim Aufbau eines Multi-Energiesystems nutzen⁶⁹⁶.

□ Entwicklungsziele

Eine umfassende Zusammenstellung der Entwicklungsziele einer allgemein verstandenen Sektorkopplung findet sich in einzelnen Expertenempfehlungen⁶⁹⁷. Andere Akteure bestätigen diese Ziele, aber deren Statements beziehen sich auf einzelne Verfahren und Technologien oder auf Planungs- und Optimierungsmethoden für integrierte Gesamtsysteme.

- Entwicklung und Weiterentwicklung effizienter Wandlungstechnologien (Zeithorizont 2025)⁶⁹⁸. Mehrfach⁶⁹⁹ wird dieses Ziel mit der Skalierbarkeit und Verfügbarkeit der Wandlungstechnologien vom Maßstab Kilowatt bis in den mehrstelligen Megawattbereich ver-

⁶⁸⁷ [A1]; [C2]; [C4]; [F3]; [H9] (AG4)

⁶⁸⁸ [B2]; [C2]; [C5]; [C9]; [D1]; [F2]; [F3]; [G1]; [H8]; [H9]

⁶⁸⁹ [E7]; [H1]

⁶⁹⁰ [C4]; [D1]; [F1]; [H8] (AG4)

⁶⁹¹ [F1]; [F2]; [F3]

⁶⁹² [C2]

⁶⁹³ [B2]; [C2]; [C3]

⁶⁹⁴ [B2]; [G1]

⁶⁹⁵ [C4]; [C5]; [G1]; [H9] (AG4)

⁶⁹⁶ [C4]; [E6]; [F3]; [H9] (AG4)

⁶⁹⁷ [H9] (AG4)

⁶⁹⁸ [B2]; [C5]; [H8]; [H9]

⁶⁹⁹ [B2]; [C9]; [F2]; [H8]; [H9]

knüpft. Darüber hinaus wird als Entwicklungsziel genannt, dass die Wandler flexibel bzw. dynamisch betrieben werden können⁷⁰⁰.

- Methoden und Verfahren für großskalige bzw. serientaugliche Produktions- und Herstellungsverfahren für Komponenten und Technologien zur Sektorkopplung (Zeithorizont 2025)⁷⁰¹
- Modellierungswerkzeuge zur Integration alternativer Infrastrukturen (Zeithorizont 2020 bis 2022)⁷⁰²
- Planungsmethoden für die optimale Auslegung einer gesamten Versorgungsinfrastruktur unter Berücksichtigung alternativer Energieträger (Zeithorizont 2022)⁷⁰³
- Betriebsführungskonzepte für ein sektorübergreifendes Energiesystem mit dem Ziel einer synergetischen Optimierung (Zeithorizont 2025)⁷⁰⁴. Die Verwendung modernster Ansätze aus der IKT-Forschung für die Modellierung, Planung und Betriebsführung bzw. -optimierung ist erforderlich, um diese Herausforderungen bewältigen zu können⁷⁰⁵.
- Demonstratoren und Pilotanlagen einer gesamtheitlichen Versorgungsinfrastruktur (Zeithorizont 2025)⁷⁰⁶
- Neben den Zielstellungen für das Energiesystem und einzelne Technologien zur Sektorkopplung werden vereinzelt Entwicklungsziele für spezielle Produkte genannt. Bis 2030 sollen nach einem Papier⁷⁰⁷ alternative Kraftstoffe im klimapolitisch notwendigen Maßstab über die Sektorkopplung hergestellt werden. Eine Bewertung verschiedener mit Strom erzeugbarer Produkte und ihrer Marktpotenziale wird auch von einem Akteur⁷⁰⁸ als notwendig dargestellt.
- Im Gebäudebereich steht die Wärmeversorgung im Mittelpunkt. Daher wird hier eine zukünftige Energieversorgung nicht auf thermische Energiespeicher verzichten können. Dezentrale Speicherkonzepte zur Integration solarthermischer Wärme oder erneuerbarer Elektrizität aus Photovoltaik (PV) und Windenergie (Power-to-Heat) können das fluktuierende Angebot dem Bedarf anpassen (Zeithorizont 2020)⁷⁰⁹.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die folgende Tabelle stellt neue Themen, die im Konsultationsprozess genannt wurden, und Schwerpunkte des laufenden Energieforschungsprogramms, die aus Sicht der Akteure fortgeführt werden sollen, gegenüber.

⁷⁰⁰ [A1]; [C2]; [C4]; [E7]; [F2]; [H8]; [H9]

⁷⁰¹ [A1]; [H8]; [H9]

⁷⁰² [F3]; [H3] (AG3); [H9]

⁷⁰³ [B2]; [C4]; [E6]; [F2]; [H3] (AG3); [H8]; [H9]

⁷⁰⁴ [B2]; [E6]; [F3]; [H8]; [H9]

⁷⁰⁵ [C7]; [E6]; [F3]

⁷⁰⁶ [A4]; [F2]; [F3]; [G1]; [H9]

⁷⁰⁷ [F2]

⁷⁰⁸ [C3]

⁷⁰⁹ [C2]; [C5]

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Die Verknüpfung der Infrastrukturen für Elektrizität, Wärme und Verkehr ist eine Weiterentwicklung des bisherigen Ansatzes, bei dem die in den einzelnen Sektoren genutzten Infrastrukturen unabhängig voneinander geplant und ausgebaut werden. • Die Umwandlungstechnologien an den Kopplungsstellen gewinnen dadurch eine hohe Bedeutung für die Forschungsförderung. • Gleiches gilt für die Modellierungsansätze, die bisher sektorspezifisch, und nicht sektorübergreifend ausgelegt sind. • Die Betriebsführung der gekoppelten Infrastrukturen erfordert Entwicklungsarbeiten zu Digitalisierungstechniken wie IKT und IoT. • Die Erprobung der Technologien zur Sektorkopplung erfordert Demonstrationsprojekte und systemische Projekte in Modellregionen. • Die Demonstration muss sich auf den Betrieb von Umwandlungsanlagen sowie die Produktionsverfahren für entsprechende Anlagen und deren Komponenten beziehen. • Der Betrieb der Demonstrationsanlagen (z. B. großer Power-to-X-Anlagen) erfordert Experimentierklauseln bzw. regulatorische Innovationszonen. Unter diesen Ausnahmebedingungen können neue Geschäftsmodelle und Einsatzfelder erprobt und weiterentwickelt werden. • Die Integration bisher getrennter Infrastrukturen schafft neue Möglichkeiten zur Partizipation an der Energiewende, z. B. durch alternative Kraftstoffe aus Strom. Die Einführung muss durch Forschungsarbeiten zu Partizipation und Akzeptanz vorbereitet werden. • Hoher Anpassungsbedarf besteht beim Marktmodell und beim regulatorische Rahmen. Es sind Forschungsarbeiten zum Rechtsrahmen notwendig, unter dem die Sektorkopplung wirtschaftlich werden könnte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung effizienter Wandlungstechnologien zur Sektorkopplung. Kerntechnologien sind Elektrolyseure, Power-to-X-Anlagen und Konzepte zur Umsetzung und Einbindung von Power-to-Heat in Quartiere. • Konsequente Verfolgung der Entwicklungsziele Kostensenkung, Erhöhung der Lebensdauer, Erhöhung der Umwandlungseffizienz und Steigerung der Flexibilität • Forschungsarbeiten im Bereich der Grundlagenforschung und Angewandten Forschung für Anlagen bis in den Megawattmaßstab • Forschungsarbeiten zur Katalyse, kostengünstigen Materialien und neuen thermochemischen Verfahren • Integration biochemischer Verfahren in Power-to-X Prozesse

Die Umsetzung der Sektorkopplung erfordere erhebliche Anstrengungen im Bereich der Forschung, Entwicklung und Demonstration von Verfahren und Technologien zur strombasierten Erzeugung von synthetischem Erdgas, synthetischen Kraftstoffen oder anderen chemischen Produkten⁷¹⁰. Weiterhin seien innovative Power-to-Heat-Konzepte notwendig, die an die Sektorkopplung anknüpfen und der optimierten Integration von erneuerbaren Energien in den Wärmesektor dienen⁷¹¹.

Den Technologien zur Sektorkopplung wird u.a. in der Onlineumfrage eine hohe Priorität für die Energieforschung beigemessen,⁷¹². Diese Einschätzung sei im Vergleich zu einer früheren Befragung aus dem Jahr 2011 noch gewachsen⁷¹³. Die Förderbekanntmachung „Energiewende im Verkehr“, die auf dem laufenden 6. Energieforschungsprogramm aufbaut und dessen Themen weiterentwickelt und miteinander verknüpft, könne als Grundlage dienen, um eine nationale Strategie aufzubauen⁷¹⁴.

Technische Zielgrößen bei der Entwicklung sind: die Effizienzsteigerung, die Senkung des Eigenenergiebedarfs⁷¹⁵ sowie die Erhöhung der Leistungsdichte und der Lebensdauer⁷¹⁶. Die Wandlungsverfahren sollten dynamisch bzw. flexibel zu betreiben sein, damit die Sektorkopplung einen Beitrag zur Erhöhung des Flexibilitätsangebots leisten könne, um zu ermöglichen, große Mengen erneuerbarer Energien aufzunehmen⁷¹⁷. Die Energiewandlung solle dabei nicht nur vom Stromsektor in andere Sektoren, sondern auch bidirektional möglich sein⁷¹⁸. Ein Beispiel hierfür sei die mögliche Wiederverstromung alternativer Kraftstoffe, die die Flexibilität innerhalb des Energiesystems steigern könne⁷¹⁹.

Um die erforderliche systemische Dimension einnehmen zu können, müssten die Wandlungsanlagen skalierbar sein⁷²⁰. Der Forschungsfokus solle daher sowohl die Entwicklung von Anlagen im mehrstufigen Megawattmaßstab als auch dezentrale Kleinsysteme umfassen⁷²¹. Hierzu zählten auch solche in hohen Entwicklungsstufen, wie z. B. TRL 5-7⁷²². Durch die Verfügbarkeit von Anlagen im Megawattmaßstab im Rahmen von Leuchtturmprojekten werde unter anderem die Sichtbarkeit der Technologien in der Industrie erhöht⁷²³. Darüber hinaus seien erhebliche Kostenreduktionen durch günstigere Materialien sowie durch großskalige und serientaugliche Produktionsverfahren erforderlich⁷²⁴.

⁷¹⁰ [A1]; [C2]; [C4]; [C9]; [F3]; [G1]; [H8]; [H9]; [I1]

⁷¹¹ [B2]; [H1]; [H4]; [H8]; [H9]

⁷¹² [C4], [I1]

⁷¹³ [C2]

⁷¹⁴ [F2]

⁷¹⁵ [B2]; [H8]; [H9]

⁷¹⁶ [H8] (AG4)

⁷¹⁷ [A1]; [C2]; [C4]; [E7]; [F2]; [G1]; [H8]; [H9]

⁷¹⁸ [F3]; [H9] (AG4)

⁷¹⁹ [F2]

⁷²⁰ [A1]; [B2]; [F2]; [H8]; [H9]

⁷²¹ [H9] (AG4)

⁷²² [A5]

⁷²³ [C9]

⁷²⁴ [A1]; [C2]; [H8]; [H9] (AG4)

Viele Akteure spezifizieren die zu entwickelnden Umwandlungstechnologien nicht oder empfehlen sogar explizit eine technologieoffene Entwicklung⁷²⁵. Folgende Technologien werden explizit genannt:

- Biologische Methanisierung⁷²⁶
- Flexible Power-to-X-Prozesse mit Schwerpunkt auf Synthese- und Katalysatoren-Entwicklungen⁷²⁷. Das Forschungsthema Katalyse wird auch in einem Positionspapier⁷²⁸ empfohlen. Ein anderer Akteur⁷²⁹ spricht sich mit hoher Priorität für Verfahren zur thermochemischen und katalytischen Methanisierung aus.
- Methanolsynthese⁷³⁰
- Fischer-Tropsch-Verfahren⁷³¹
- Hydrierungs- oder Hydroformylierungs-Prozesse⁷³²
- Direkte Stromeinkopplung in endotherme Prozesse mit Plasma oder anderen Verfahren⁷³³
- Die Teilnehmer der Onlineumfrage⁷³⁴ ergänzen den Entwicklungsbedarf um die Technologien der CO₂-Abscheidung aus der Luft, messen ihr aber eine geringe Priorität zu. In einem Positionspapier⁷³⁵ wird dagegen positiv bewertet, dass nur diese Technologie und die Verwendung von CO₂ aus Biomasse nachhaltig seien.
- Entwicklung flexibel nutzbarer chemischer Speicherstoffe als Energiespeicher, Edukte, Intermediate, chemische Produkte und unkonventionelle Speicherstoffe⁷³⁶
- Power-to-Heat wird als prioritäres Förderthema dargestellt, da diese Technologie den Power-to-Gas Verfahren aus wirtschaftlichen Gründen überlegen sei⁷³⁷.

Über die Technologieentwicklung hinaus benötige die Entwicklung und Implementierung der Sektorkopplung Ansätze der systemischen Forschung. Die hinreichend genaue Abbildung der Komponenten gekoppelter Energieinfrastrukturen erfordere einheitliche Modellierungswerkzeuge und -verfahren⁷³⁸. Die wesentlichen Komponenten eines zukünftigen Energiesystems müssten in ihren physikalischen, dynamischen, stochastischen und systemischen Eigenschaften exakt beschrieben werden⁷³⁹. Dazu schlagen die Akteure z. B. die Entwicklung hochdynamischer Energiesystemmodelle vor, wie z. B. Verfahren des Digital State Estimator⁷⁴⁰. Hiervon ausgehend ließen sich Planungsmethoden zur optimalen Auslegung einer gesamtheitlichen Versorgungsinfrastruktur entwickeln⁷⁴¹.

⁷²⁵ [B2]

⁷²⁶ [H1] (AG2); [I1]

⁷²⁷ [H8] (AG2)

⁷²⁸ [E6]

⁷²⁹ [I1]

⁷³⁰ [C2]; [C9]

⁷³¹ [B2]; [C9]; [I1]

⁷³² [C9]

⁷³³ [C9]; [H8] (AG4)

⁷³⁴ [I1]

⁷³⁵ [H1] (AG2)

⁷³⁶ [H8] (AG4)

⁷³⁷ [D1]

⁷³⁸ [H9] (AG5)

⁷³⁹ [F3]; [H3] (AG3)

⁷⁴⁰ [E6]

⁷⁴¹ [B2]; [C4]; [E6]; [F2]; [H3]; [H8]; [H9]

Der übergreifende Betrieb der gekoppelten Infrastrukturen könne zur Erschließung von Synergiepotenzialen und zur Veränderung der Strukturen führen⁷⁴². Beispielsweise seien Rückwirkungen auf die notwendige Kraftwerksleistung und auf die Residuallasten möglich. Außerdem könnten weitere Sektoren elektrifiziert werden⁷⁴³. Durch ein aktives, ganzheitliches Management des Verbrauchs der unterschiedlichen Energieformen ließe sich die Stabilität des Stromnetzes erhöhen und die steigende Erzeugung erneuerbarer Energien integrieren⁷⁴⁴.

Der Forschungsbedarf liege in Optimierungsverfahren⁷⁴⁵, die um harmonisierte Schnittstellen zur betrieblichen Einbindung der Wandlungsanlagen zu ergänzen seien⁷⁴⁶. Dazu schlagen die Akteure die Entwicklung einer Echtzeit-IoT-Kommunikationsinfrastruktur vor⁷⁴⁷. Darüber hinaus bedürfe es systemischer Projekte mit großen Demonstratoren zur Verifizierung und Validierung im praktischen Maßstab⁷⁴⁸, die unter den Bedingungen eines Reallabors bzw. einer regulatorischen Innovationszone⁷⁴⁹ betrieben würden. Die Stadt Hamburg biete sich als Reallabor für die Sektorkopplung an⁷⁵⁰. Eine weitere Forderung adressiert Forschungsarbeiten zum regulatorischen Rahmen sowie zur Geschäftsmodellentwicklung und von Akzeptanz und Beteiligung⁷⁵¹. Die zugehörigen Forschungsansätze werden im nächsten Abschnitt direkt in Beziehung zu den aktuellen Hemmnissen und Markthürden gesetzt und diskutiert.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Energiewende konzentrierte sich in Deutschland bisher auf den Energieträger Strom. Die mögliche Kopplung der Energiesektoren untereinander sowie mit den chemischen Grundstoffen sei in der Technologiediskussion bislang unterrepräsentiert⁷⁵². Dementsprechend sei der ordnungspolitische Rahmen noch nicht auf die Sektorkopplung angepasst und müsse nach umgestaltet werden⁷⁵³. Zurzeit bestünden deutliche regulatorische Hürden sowohl für Energiespeicher und deren Integration als auch für die Sektorkopplung⁷⁵⁴. Insbesondere die unterschiedliche Belastung der Energieträger mit Abgaben und Umlagen erweise sich als Hemmnis für die Entwicklung der Sektorkopplung⁷⁵⁵. Daraus leite sich Forschungsbedarf zur langfristigen Gestaltung des regulatorischen Rahmens für Energiespeicher und die Sektorkopplung ab⁷⁵⁶. Bei der Gestaltung eines innovativen Rahmens sei es sinnvoll, die Klimaschutzstrategien und Rechtsrahmen im europäischen Ausland zu berücksichtigen. Insgesamt erfordere die Einbettung des deutschen Energiesystems in das europäische System eine internationa-

⁷⁴² [A2]; [B2]; [C7]; [E6]; [F3]; [H3]; [H8]; [H9] (AG4)

⁷⁴³ [C3]

⁷⁴⁴ [H9]

⁷⁴⁵ [B2]; [E6]; [F3]; [H9]

⁷⁴⁶ [B2]

⁷⁴⁷ [C7]

⁷⁴⁸ [A1]; [A4]; [C2]; [C8]; [F2]; [F3]; [G1]; [H8]; [H9]

⁷⁴⁹ [E7]

⁷⁵⁰ [B2]

⁷⁵¹ [A1]; [A5]; [C4]; [E7]; [F1]; [F2]

⁷⁵² [C8]

⁷⁵³ [A2]; [C2]

⁷⁵⁴ [C4]; [C8]

⁷⁵⁵ [C4]

⁷⁵⁶ [A1]; [A2]; [B2]; [C2]; [E7]; [H9] (AG4)

le Harmonisierung der Strategien und Schnittstellen⁷⁵⁷. Eng mit den Markthürden durch den regulatorischen Rahmen verbunden sei die Wirtschaftlichkeit von Technologien zur Sektorkopplung. So sei Power-to-Heat verfahrensbedingt näher an der Wirtschaftlichkeit als Power-to-Gas⁷⁵⁸. Dabei sei ein Markt für die Sektorkopplung zu erwarten, wenn die dem System zu entnehmenden Strommengen den Flexibilitätsbedarf überstiegen⁷⁵⁹. Um die aktuellen Markthürden zu überwinden, bedürfe es Forschung zu Marktmodellen und -mechanismen, Geschäftsmodellen und möglichen Betriebsweisen von (Langzeit-) Speichern und Anlagen zur Sektorkopplung⁷⁶⁰. Dabei sei es wichtig, Hemmnisse durch eine Themenbeschränkung in der Forschung zu vermeiden. Die Akteure⁷⁶¹ empfehlen daher eine themen- und technologieoffene Förderung von Forschung und Entwicklung.

Durch die Sektorkopplung werde die Herkunft einiger Produkte wie Kraftstoffe oder Wärme verändert, mit denen jeder Bürger alltäglich Berührung hat. Dadurch hänge der Erfolg der Energiewende im Mobilitäts- oder im Wärmemarkt stark von der Akzeptanz der Gesellschaft ab⁷⁶². Das Verhalten von Verbrauchern und Nutzern in Haushalten und Industrie im Umgang mit den Technologien für Power-to-X, Smart Heat oder Speicherung sei von hoher Bedeutung und sollte eingehender modelliert⁷⁶³ und erforscht werden⁷⁶⁴. Durch die Partizipation könne eine höhere Technikakzeptanz gegenüber der Sektorkopplung und ihren Produkten erreicht werden⁷⁶⁵. In gleicher Weise gilt das auch für Abbau möglicher Markthürden⁷⁶⁶. Hierbei seien die Möglichkeiten und Grenzen der Digitalisierung zu berücksichtigen. So werde durch die wachsende Vernetzung im Falle des massiven Einsatzes von Speichern und der Sektorkopplung die Einstellung der Gesellschaft hinsichtlich Datensicherheit und Datenschutz im Energiesystem eine zunehmend wichtige Rolle spielen⁷⁶⁷.

Als weiteres Hemmnis im Bereich der synthetischen Kraftstoffe nennen die Akteure die noch fehlende Infrastruktur für Wasserstoff und strombasierte Kraftstoffe⁷⁶⁸. Ergänzend dazu schlagen sie vor, frühzeitig und auf Basis einer auf ganzheitlicher Betrachtung basierenden Festlegung eine begrenzte Zahl – z. B. drei – synthetische Kraftstoffe auszuwählen⁷⁶⁹. Die Forschung solle sich dann entsprechend fokussieren, wobei neben der CO₂-Intensität der Kraftstoffe auch die schadstoffarme Verbrennung ein wesentliches Kriterium für die Auswahl sei. Die Forschung sollten solche Entwicklungen vorantreiben, die sich bis zum Jahr 2030 kommerzialisieren ließen.

⁷⁵⁷ [C2]; [H9]

⁷⁵⁸ [D1]

⁷⁵⁹ [C9]

⁷⁶⁰ [A2]; [A5]; [B2]; [F1]; [F3]; [G1]; [H8]

⁷⁶¹ [C2]; [C4]; [C8]; [G1]

⁷⁶² [C4]

⁷⁶³ [H3]

⁷⁶⁴ [E7]

⁷⁶⁵ [E7]; [F1]

⁷⁶⁶ [F2]; [H9]

⁷⁶⁷ [E7]

⁷⁶⁸ [H10]

⁷⁶⁹ [F2]

3.21 CO₂-Technologien

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Die Begrenzung des CO₂ Anstiegs in der Atmosphäre wird als eine Kernaufgabe der Klimapolitik gesehen, so die Akteure in ihren Positionspapieren und Expertenempfehlungen. Die Reduktion von CO₂-Emissionen sei somit auch ein zentrales Ziel der Energiepolitik. Neben der grundsätzlichen Vermeidung von CO₂-Emissionen könnten technische Lösungen dazu beitragen, dieses Ziel zu realisieren. Eine höhere Effizienz bei der Strom- und Wärmeerzeugung senke Kosten und Emissionen und stünde daher seit langem im Fokus der Kraftwerks- und Energieforschung.

Teilweise könne dies durch die Modifizierung der erforderlichen technischen Prozesse erfolgen, teilweise müssten Prozesse neu entwickelt werden. Allerdings ließen sich CO₂-Emissionen auch bei einigen Produktionsprozessen, z. B. in der Stahl- oder Zementindustrie, bislang kaum oder gar nicht vermeiden. Für die großtechnische Stromerzeugung in Kraftwerken hingegen existierten bereits technisch weitgereifte Lösungen, um CO₂ aus den Prozessen abzuscheiden. Diese Technologien seien weiterzuentwickeln und auf Bereiche außerhalb des Energiesektors zu übertragen. Die ambitionierten Klimaziele ließen sich mittelfristig nicht allein durch effizienzsteigernde Maßnahmen und den Einsatz alternativer Energien erreichen⁷⁷⁰. Überall dort, wo Emissionen nicht zu vermeiden seien, sollte der Kohlenstoffkreislauf geschlossen werden. Darüber hinaus sei es sinnvoll, auch Optionen für negative CO₂-Emissionen zu erforschen, wie z. B. die Biomassevergasung und die CO₂-Abscheidung aus der Luft⁷⁷¹.

CO₂ werde bereits vielfältig genutzt. Beispiele gebe es in der Getränkeindustrie oder zur Begasung und Ertragssteigerung in Gewächshäusern. Auch als Arbeitsmedium in unterschiedlichen Prozessen wie Kühlaggregate oder möglicherweise anstelle von Wasserdampf im Kraftwerksprozess käme das Gas infrage. Bei den Nutzungsmöglichkeiten bestehe noch ein immenses Potenzial. Darüber hinaus ließe sich CO₂ auch zu Kraft- und Brennstoffen oder Chemikalien weiterverarbeiten und erlaube somit, langfristig den Bedarf an fossilen Rohstoffen wie Gas, Öl oder Kohle stark zu reduzieren. Durch die Nutzung von CO₂ als „Rohstoff“ ergäben sich Möglichkeiten, Energie in Form von eingelagertem CO₂ zu speichern. Viele der dazu notwendigen Prozessschritte und Technologien seien prinzipiell schon länger verfügbar. Sie müssten allerdings an die neuen Anforderungen angepasst werden, um die gewünschte Dekarbonisierung der Energieversorgung zu ermöglichen⁷⁷².

Für abgetrenntes CO₂, das nicht als „Rohstoff“ direkt weiterverwertet werden könne oder das dauerhaft gespeichert werden solle, seien entsprechende Infrastrukturen zu entwickeln und aufzubauen. Es gelte, dezentrale Speicher- bzw. Zwischenspeicheroptionen zu entwickeln und zu erforschen. International werde bisher die CO₂-Langzeitspeicherung nur beim Einsatz in der Öl- und Gasindustrie wirtschaftlich betrieben, um die Produktivität von Lagerstätten zu fördern (Enhanced Oil /Gas Recovery). Eine dauerhafte Speicherung sei in Deutschland gegenwärtig nicht vorgesehen und für die Umsetzung der Energiewende zur Erreichung der Klimaziele auch nicht nötig. Daher stehe hierzulande eine zentrale Speicherung derzeit nicht im Fokus. Allerdings gebe es dennoch eine Begleitfor-

⁷⁷⁰ [A3]; [H8] (AG2)

⁷⁷¹ [F1]

⁷⁷² [A3]; [C3]; [H8] (AG2)

schung, da weltweit zur Senkung der CO₂-Emissionen nicht auf die unterirdische Speicherung verzichtet werden könne⁷⁷³.

Die notwendigen Forschungsarbeiten zu den genannten Themen seien in enger Kooperation von Wissenschaft und Industrie durchzuführen, so dass deutsche Unternehmen und Forschungsinstitutionen eine Vorreiterrolle bei CO₂-Technologien einnehmen und diese zu einer Exporttechnologie entwickeln könnten⁷⁷⁴.

□ Entwicklungsziele

- Skalierbare technologische Prozesse und wirtschaftliche Konzepte zur branchenspezifischen CO₂-Abscheidung⁷⁷⁵
- Betriebskonzepte und Flexibilität von CO₂-Infrastrukturen und Werkstoffvorschläge für unterschiedliche Einsatzbereiche⁷⁷⁶
- Robuste Verfahren und neuartige Katalysatoren mit hoher Flexibilität zur Umwandlung von CO₂ in Treibstoffe und (Grund-) Chemikalien, inkl. Demonstration einer kompletten CCU-Kette (Carbon Capture Utilization [CCU] ist die stoffliche Verwertung von abgetrenntem CO₂ in üblichen Industrieprodukten, wie z. B. Polyurethan)⁷⁷⁷
- Valide Kriterien zur Standortuntersuchung, -bewertung und -auswahl, die vorhandene Potenziale von Speichern für industrielle Emissionen aufzeigen und validierte Anforderungen an die einzuspeisenden CO₂-Ströme und das CCS/CCUS-Netz zurückkoppeln⁷⁷⁸

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Neben Forschungsthemen, die bereits im laufenden Energieforschungsprogramm enthalten sind und die nach den vorliegenden Positionspapieren und Expertenempfehlungen fortgesetzt werden sollen, gibt es auch eine Reihe von Vorschlägen für neue Forschungsschwerpunkte. Die folgende Übersicht zeigt die wichtigsten neuen und fortzuführenden Bereiche.

⁷⁷³ [H8] (AG2)

⁷⁷⁴ [A1]; [A3]; [H8] (AG2)

⁷⁷⁵ [H8] (AG2)

⁷⁷⁶ [H8] (AG2)

⁷⁷⁷ [H8] (AG2)

⁷⁷⁸ [H8] (AG2)

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • CO₂-Nutzung und Wandlung: <ul style="list-style-type: none"> - Direkte Nutzung (auch als Arbeitsmedium) - Treibstoffe und Chemikalien aus CO₂ - Demonstration einer kompletten CCU-Kette (robuste und flexible Verfahren, neuartige Katalysatoren) • CO₂-Abscheidung: <ul style="list-style-type: none"> - branchenspezifische Abscheidung aus industriellen Prozessen - skalierbare Prozesse und wirtschaftliche Konzepte - CO₂-Abscheidung direkt aus der Atmosphäre. • CO₂-Infrastruktur: <ul style="list-style-type: none"> - Betriebskonzepte und Flexibilität von CO₂-Infrastrukturen - Werkstoffe für unterschiedliche Einsatzbereiche und Komponenten - Potenziale von Speichern für industrielle Emissionen - Valide Kriterien zur Standortuntersuchung, -bewertung und -auswahl von Speichern - Rückkopplung validierter Anforderungen an die einzuspeisenden CO₂-Ströme und das CCS/CCUS-Netz 	<ul style="list-style-type: none"> • Prozesse zur Nutzung von CO₂ (z. B. in der chemischen Industrie). • CO₂-Abscheidung: technologieoffene Erforschung der Technologien inkl. „Carbonate und Chemical Looping“ und membranbasierter Verfahren • CO₂-Transport und -Speicherung: <ul style="list-style-type: none"> - Speicherung in unterschiedlichen geologischen Formationen - Informationssysteme für CO₂-Speicher und Deckgesteine - Sicherheitskonzepte inkl. Überwachung und Monitoring-Verfahren; Risikoanalysen; Simulation zur Ausbreitung des CO₂ im Untergrund; Langzeitverhaltens von CO₂ im Untergrund - Auswirkungen abscheidungsbedingter Zusatzstoffen im CO₂-Strom auf Pipelines und Speicher (z. B. Korrosion, Carbonatbildung).

Die jeweils aussichtsreichsten, technologisch weit entwickelten Abscheidetechnologien und -anlagen sollten nunmehr verstärkt für ihren Einsatz an industriellen CO₂-Quellen mit hohen Emissionsraten, z. B. BHKW bzw. stationäre Motoren und Turbinen sowie Produktionsprozesse für Stahl, Zement und andere Grundstoffe, modifiziert, angepasst, erprobt und optimiert werden⁷⁷⁹. Diese technologischen Prozesse müssten skalierbar sein, um branchenspezifisch wirtschaftliche Konzepte zur CO₂-Abscheidung in Abhängigkeit von politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu ermöglichen⁷⁸⁰.

⁷⁷⁹ [A3]; [H2]; [H8] (AG2)

⁷⁸⁰ [H8] (AG2)

Auch die direkte CO₂-Abtrennung aus der Atmosphäre sei eine Option, die untersucht werden solle, um langfristig auch negative CO₂-Emissionen in den Blick zu nehmen⁷⁸¹.

Im Kraftwerkssektor stehe als nächster logischer Schritt eine großtechnische Demonstrationsanlage an. Gegebenenfalls käme dafür auch eine noch langfristig betriebene Müllverbrennungsanlage infrage, da Deutschland beschlossen habe, weitestgehend auf die Stromproduktion durch Verbrennung fossiler Energieträger zu verzichten. Damit werde auch der Einstieg in eine Kohlenstoffkreislaufwirtschaft unterstützt. Die erforderlichen Mehrinvestitionen bzw. spezifischen Abscheidungskosten seien jedoch mit den derzeit niedrigen Preisen für Emissionszertifikate nicht zu erlösen. Es fehlen monetäre Marktanreize. Die CO₂-Abtrennung könne als ein wesentlicher Schritt zum Aufbau eines CO₂-Kreislaufs betrachtet werden und biete gute Möglichkeiten für Innovationen, um synthetische Kraftstoffe zu entwickeln. In diesem Bereich erstreckte sich die sinnvolle Forschung von den Grundlagen über Systembetrachtungen bis hin zu Demonstrationsanlagen. An diesen Arbeiten sei die Industrie angemessen zu beteiligen und für ihre erfolgreiche Umsetzung bedürfe es auch einer Akzeptanzforschung⁷⁸². Der Umgang mit CO₂ stelle hinsichtlich Korrosion spezielle Anforderungen an die Materialien, die Werkstoffentwicklungen für relevante Druck- und Temperaturbereiche erforderlich machten. Diese Anforderungen seien abhängig vom jeweiligen Einsatzzweck zu erarbeiten.

CO₂ ließe sich u.a. vorteilhaft als Arbeitsmedium, zum Beispiel als superkritisches CO₂ in alternativen Kraftwerks- bzw. Organic Rankine Cycle- (ORC-) Prozessen sowie in Kühlaggregaten und Klimaanlage einsetzen. Dieses dynamisch wachsende Technologiefeld biete Potenzial zu deutlich kompakteren Anlagengrößen mit hoher Flexibilität. Für den Einsatz in den unterschiedlichen Anwendungen sollten technologische und wirtschaftliche Bedürfnisse erforscht und erarbeitet werden. Als ein weiteres Thema nennen die Akteure den Einsatz von CO₂ als Wärmeträgermedium in Erdwärmesonden und geothermischen Anwendungen.

Die Entwicklung von CO₂-Zwischenspeichern nebst der zugehörigen Infrastruktur und der Auswirkungen auf die Umwelt werde zur Flexibilisierung der gesamten CO₂-Abscheide- und -Nutzungstechnologie essentiell sein. Ergänzend zu den Forschungsarbeiten im Bereich von Transport und Umgang mit CO₂ seien die Entwicklung von Methoden für Produkte und Prozesse, Pilot- und Demonstrationsprojekte sowie die Akzeptanzforschung erforderlich⁷⁸³. CO₂ könne mit nachhaltig erzeugtem Wasserstoff oder anderen Stoffen zu Kraft- und Brennstoffen oder zu Grundchemikalien bis hin zu Polymeren umgewandelt werden. Die Akteure schlagen für das Thema alternative Brennstoffe eine eigene Forschungsinitiative vor⁷⁸⁴. Dies eröffne die Perspektive für einen weitgehenden Verzicht auf fossile kohlenstoffhaltige Rohstoffe, wie Kohle, Gas und Öl. Diese Umwandlungsverfahren böten prinzipiell Möglichkeiten, über CO₂ eine Pufferung bzw. Speicherung von Energie vorzunehmen. Diese Verfahren und die notwendigen Technologien sollten so weiterentwickelt werden, dass sie robust und mit hoher Flexibilität einen großtechnischen Einsatz erlaubten⁷⁸⁵.

Der Schwerpunkt für die Forschung zu flexiblen Power-to-X-Prozessen liege prioritär auf den Arbeiten zu Synthese- und Katalysatoren-Entwicklungen. Im Vordergrund ständen dabei die Ziele, den Reaktionsumsatz zu erhöhen sowie eine hohe Selektivität und Stabilität gegenüber Verunreinigungen

⁷⁸¹ [F1]

⁷⁸² [A3]; [H8] (AG2)

⁷⁸³ [A3]; [H8] (AG2)

⁷⁸⁴ [C6]

⁷⁸⁵ [A3]; [H8] (AG2)

zu garantieren. Aber auch eine direkte elektrochemische CO₂-Umsetzung zu den angesprochenen Wertstoffen soll weiter erforscht werden⁷⁸⁶. In diesem Zusammenhang gehe es darum, Fragen der Gasprozess-Konditionierung („Feedgas“) und der energieeffizienten Verdichtung von CO₂, z. B. durch elektrochemische Kompression und hocheffiziente Kompressoren, zu untersuchen und zu beantworten. Dies erfordere insgesamt eine Senkung des Eigenenergiebedarfs sowie der Investitions- und Betriebskosten der etablierten Verfahren unter Einbeziehung der branchenspezifischen Anforderungen. Mit der Zuführung von CO₂ in einen geschlossenen Stoffkreislauf biete sich die Möglichkeit zur innovativen Entwicklung synthetischer Kraftstoffe. Deren Vorteil gegenüber einer Elektrifizierung liege darin, dass die bestehende Infrastruktur weiterhin genutzt werden könne. Demonstrationsanlagen im technisch relevanten Maßstab sowie eine komplette CCU Kette sollten realisiert werden. Eine umfassende Bewertung inklusive der ökonomischen Aspekte, wie Lebenszyklusanalysen und ein Vergleich mit herkömmlichen Verfahren, sowie der Umweltauswirkungen und der Akzeptanz von Produkten könne Handlungsvorschläge für die Politik erarbeiten⁷⁸⁷.

Die Speicherung von CO₂ – sowohl dauerhaft wie auch vorübergehend – sei Voraussetzung für eine CCS- und CCU-Infrastruktur. Bisher betrachtete Speicheroptionen berücksichtigten den Speicherbedarf von Großkraftwerken an Standorten auf dem Festland. Dezentrale kleinere Zwischenspeicher oder dauerhafte Speicher für industrielle Emittenten könnten alternative Speicheroptionen nutzen. Bündelung und Transport von CO₂ aus unterschiedlichen Quellen zur Speicherung unterhalb des Meeresbodens seien mögliche Optionen, zu denen gegenwärtig aber noch keine geo- und sicherheitstechnischen Anforderungen vorlägen. Bei der Nutzung von Biomasse für CCS oder der direkten Speicherung von Kohlenstoff in Böden sei die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen entscheidend, um transmediale Problemverlagerungen oder zusätzliche Umweltprobleme zu vermeiden. Umfassende und vergleichende Ökobilanzen seien für diese Klimaschutzoptionen noch nicht vorhanden. Folglich solle der Aufbau und die Verwendung von unterirdischen Pufferspeichern erforscht werden. Die Anforderungen an kleine dezentrale Speicher und alternative Speicherkonzepte, z. B. in Formationswässern gelöstes CO₂ oder kapillare Bindung in offenen Aquiferen, sowie an die Sicherheit von Speichern müssten erprobt und definiert werden. Die Gefahrenquellen liegen hierbei im Bereich der unverfestigten Gesteine in Deckgebirgen und Störungen.

Die Detektion von CO₂ unter realen Umweltbedingungen in Pilot- und Demonstrationsprojekten sei zu erproben und die Nachweisgrenzen zu verfeinern. Als Ergebnis würden valide Kriterien zur Standortuntersuchung, -bewertung und -auswahl erwartet, die vorhandene Potenziale von Speichern für industrielle Emissionen aufzeigten und validierte Anforderungen an die einzuspeisenden CO₂-Ströme und das CCS/CCUS-Netz zurückkoppelten. Das gestatte umfassende Ökobilanzen zu CCS- und Bio-CCS-Konzepten. Die dafür notwendigen Forschungsarbeiten seien vorrangig im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt, denn bislang gebe es in Europa wenig praktische Erfahrungen mit großen industriellen Demonstrationsprojekten. Daher schlagen die Akteure vor, gegebenenfalls internationale Kooperationen anzustreben, z. B. im Rahmen von EU ACT oder Mission Innovation⁷⁸⁸.

⁷⁸⁶ [A3]; [H8]

⁷⁸⁷ [H8] (AG2)

⁷⁸⁸ [H8] (AG2)

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Angesichts anhaltend niedriger Preise für CO₂-Zertifikate sei es derzeit schwierig, neben dem Einsatz des Gases zur Erhöhung der Förderleistung in den Bohrfeldern für Erdöl und -gas (EOR/EOG Enhanced Oil (Gas) Recovery), weitere funktionierende Geschäftsmodelle darzustellen. Die technikspezifischen Schwierigkeiten seien weitestgehend lösbar, da auf bekannte Verfahren und Einzeltechnologien zurückgegriffen werden könne. Hauptsächlich fehle das Scale-Up für den großtechnischen Einsatz und weitere Anpassungen, um die real anfallenden CO₂-Mengen verwerten zu können. Eine zusätzliche Aufgabe stelle hierbei auch noch die möglichst energieeffiziente Zusammenführung dieser Einzeltechnologien dar. Der Aufbau der notwendigen, gigantischen Infrastruktur verlange zudem einen bislang nicht in ausreichendem Maße vorhandenen gesellschaftlichen Konsens. Bessere Perspektiven existierten daher für die Verwertung vor Ort (Re-Use) des abgetrennten und gegebenenfalls umgewandelten CO

3.22 Stromnetze

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

In Deutschland bilden die Übertragungs- und Verteilnetze nach Ansicht der Akteure das Rückgrat der zuverlässigen Energieversorgung des Wirtschaftsstandorts⁷⁸⁹. Heute sei diese Infrastruktur in einem guten technischen Zustand und zeichne sich u. a. durch im europäischen Vergleich geringe Ausfallzeiten aus⁷⁹⁰. Die Integration weiterer Erzeugungstechnologien und die Einbeziehung der Sektorkopplung zur Dekarbonisierung des Verkehrs- und Wärmesektors seien notwendig, um die politischen Zielvorgaben zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland zu erreichen⁷⁹¹. Daraus entstünden neue Aufgaben für die Stromnetze, die nur durch Ausbau, Flexibilisierung und neue Betriebsweisen zu erfüllen seien⁷⁹². Darüber hinaus gelte es, die Marktführerschaft deutscher Unternehmen im Technologiebereich zu sichern⁷⁹³.

□ Entwicklungsziele

- Neuartige und verbesserte Technologien bzw. Schutzkonzepte für die zuverlässige Verwendung in Netzbetriebsmitteln bzw. Stromnetzen (kurz- bis mittelfristig, 3 – 5 Jahre)⁷⁹⁴
- Methoden, Konzepte und IT-Werkzeuge zur Verknüpfung netztechnischer Operationen, betrieblicher Abläufe und neuer geschäftlicher Transaktionen sowie für Datenmanagement und -verarbeitung (mittelfristig; bis 5 Jahre)⁷⁹⁵
- Zuverlässiger, resilienter und (teil)automatisierter Netzbetrieb bei hoher Netzdurchdringung mit verteilten Erzeugungsanlagen (DEA), Digitalisierung der Stromnetze und neuartigen Technologien (mittel- bis langfristig, 5 – 10 Jahre)⁷⁹⁶
- Erschließung, Verbesserung und Demonstration von Flexibilitätsoptionen im Energieversorgungssystem, insbesondere durch Sektorkopplung (mittel- bis langfristig, 5 – 10 Jahre)⁷⁹⁷
- Beibehaltung der Versorgungsqualität bei geänderten Strukturen der Energieversorgung, zunehmender Digitalisierung und bei Sektorkopplung (kurz- bis langfristig, 3 – 10 Jahre)⁷⁹⁸

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die folgende Tabelle zeigt eine vergleichende Übersicht der Themenschwerpunkte, die aus Sicht der Forschungsakteure neu ins Energieforschungsprogramm aufgenommen sowie Förderbereiche, die auf der Basis des laufenden Programms weitergeführt und aktualisiert werden sollten.

⁷⁸⁹ [C2]

⁷⁹⁰ [C4]

⁷⁹¹ [A1]; [H9] (AG4)

⁷⁹² [H9] (AG1/AG4)

⁷⁹³ [H9] (AG2)

⁷⁹⁴ [H9] (AG2/AG3/AG4)

⁷⁹⁵ [A3]; [H9] (AG5)

⁷⁹⁶ [A3]; [C4]; [H9] (AG1/AG2/AG3/AG5)

⁷⁹⁷ [A1]; [A4]; [A5]; [E7]; [F1]; [F2]; [F3]; [H9] (AG4)

⁷⁹⁸ [C2]; [C4]; [H9] (AG1/AG5)

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Informationstechnische Vernetzung innerhalb des gesamten Energiesystems, insbesondere über Sektorgrenzen hinaus • Dynamische und transiente Netzsicherheitsanalysen und vorausschauende prognosebasierte Analysen auf allen Spannungsebenen • Stabilität und Resilienz des Energieversorgungssystems; Methoden und Verfahren zur Sicherheit von kritischen Infrastrukturen • Verknüpfung technischer Operationen, betrieblicher Abläufe und geschäftlicher Transaktionen, d. h. der technologischen Umsetzung eines „Smart Markets“ • Effiziente und resiliente Konzepte zur Datenhaltung und zum Datenqualitätsmanagement sowie neue Verfahren zur Datenverarbeitung und -analyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisierungslösungen für Betriebsführungsstrategien, Betriebsmittel / Netzteilnehmer und Netzausbauplanung • Verbesserte Netzintegration von Erzeugern, Speichern und Verbrauchern inklusive passender Managementkonzepte zur Erbringung von SDL • Neuartige und verbesserte Technologien bzw. Schutzkonzepte für die zuverlässige Verwendung in Netzbetriebsmitteln bzw. Stromnetzen • Neue universelle Schalt- und Schutzkonzepte sowie Sicherheitskonzepte für AC-, DC- und AC-DC-Anwendungen • Analyse des Strommarktes, der Netzstrukturen und des Energiesystems als Ganzes • Anpassung der Planungsgrundsätze und -methoden

Die Notwendigkeit der Umsetzung von Smart Grids, um eine sichere und bezahlbare Stromversorgung bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien zu erreichen, sei mittlerweile allgemein anerkannt. Im Konsultationsprozess benennen die Akteure in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren eine Vielzahl an neuen technologischen Herausforderungen, die für eine konkrete erfolgreiche Umsetzung von Smart Grids untersucht und gelöst werden müssten. Die Themen bauen auf den ersten Erfahrungen im Rahmen des laufenden Energieforschungsprogramms auf.

Besondere Aufmerksamkeit erfordere die durchgängige informatorische Vernetzung innerhalb des ganzen Energiesystems, insbesondere über Sektorgrenzen hinweg⁷⁹⁹. Die darauf aufbauende Automatisierung entlang aller Netzebenen⁸⁰⁰ werfe neue Forschungsfragen sowohl bezüglich des automatisierten Umgangs mit Netzteilnehmern, z. B. Lastmanagement⁸⁰¹, als auch bezüglich Automatisierungslösungen für Betriebsführungsstrategien, Betriebsmittel und Netzausbauplanung auf⁸⁰². Dies beinhalte neue Regelungskonzepte für Frequenz, Spannung sowie Wirk- und Blindleistung unter Einbeziehung von Speichern und Sektorkopplung⁸⁰³. Damit sollten die Beobachtbarkeit, Bewertung und automatisierte Steuerbarkeit des Gesamtsystems durch automatisierte Erfassung der Systemstruktur, dynamische und transiente Netzsicherheitsanalysen und vorausschauende prognosebasierte Analysen auf allen Spannungsebenen, sowohl im AC- als auch im DC-Netz erreicht werden⁸⁰⁴. Um

⁷⁹⁹ [A3]; [A5]; [C2]; [F2]; [F3]; [G1]; [H9] (AG2/AG5)

⁸⁰⁰ [C7]; [F1]; [H9] (AG5)

⁸⁰¹ [A1]; [A2]; [A3]; [C4]; [E6]; [E7]; [F2]; [G1]; [H9] (AG5)

⁸⁰² [A2]; [A3]; [B2]; [C4]; [F1]; [G1]; [H9] (AG1/AG2/AG3/AG4/AG5)

⁸⁰³ [A3]; [A5]; [C4]; [C5]; [E6]; [F3]; [H9] (AG1)

⁸⁰⁴ [C7]; [E6]; [F3]; [G1]; [H9] (AG1/AG2)

eine solche Automatisierung überhaupt technisch zu ermöglichen, sei die informationstechnische Anbindung von Netzkomponenten und Netzteilnehmern von hoher Bedeutung⁸⁰⁵. Ebenso erfordere die effiziente Steuerung eines derart komplexen automatisierten Systems die Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion, z. B. mittels Datenbrillen oder verbesserten Visualisierungen⁸⁰⁶.

Mit der Vielzahl an dezentralen Erzeugern, der steigenden Digitalisierung und der Zunahme an Marktteilnehmern erhöhten sich die Anforderungen an die Resilienz des Energieversorgungssystems. Die Stabilität des Systems hänge nicht mehr ausschließlich von den Netzbetriebsmitteln ab, sondern zunehmend von neuen Regelungsverfahren und der IKT. Daher seien neue Verfahren zum Normal- und Notfallbetrieb, z. B. während eines Blackouts, und zum Systemwiederaufbau unter Einbeziehung der Erzeugungsanlagen auf allen Spannungsebenen erforderlich⁸⁰⁷. Um die Sicherung und gegebenenfalls die Erhöhung der Systemzuverlässigkeit (Resilienz) trotz und durch IKT zu erreichen, seien u. a. die Forschungsanstrengungen zu automatischer Fehlererkennung, Selbstheilungsmechanismen, Weiterbetrieb bei (Teil-)Ausfällen der IKT und zur Nutzung dezentraler Ansätze zu verstärken⁸⁰⁸. In diesem Rahmen solle insbesondere die Stabilität der IKT-Unterstützung bei kleinen und großen unerwarteten Störungen stärker untersucht werden⁸⁰⁹. Die Akteure betrachten die Erarbeitung von Methoden zur allgemeinen Bewertung der Sicherheit von kritischen Infrastrukturen⁸¹⁰ sowie speziell Kriterien zur Bewertung der Wirksamkeit von IKT-Sicherheitsmaßnahmen⁸¹¹ als wichtige Herausforderungen. Um IKT-Sicherheit zu gewährleisten, solle diese sowohl beim Aufbau als auch beim Betrieb neuer Systeme mitberücksichtigt werden. Möglichkeiten seien Security-by-Design, Verfügbarkeit, Risikoanalysen und Gefahrenerkennung⁸¹². Wichtig wäre, bestehende Sicherheitsverfahren und -maßnahmen sowie sicherheitsrelevante Technologien, wie z. B. Kommunikationsprotokolle⁸¹³, kontinuierlich an technische und wissenschaftliche Fortschritte anzupassen⁸¹⁴. Auf der Ebene von Komponenten bzw. Betriebsmitteln seien neue universelle Schalt- und Schutzkonzepte sowie Sicherheitskonzepte für AC-, DC- und AC-DC-Anwendungen zur Erhöhung der Resilienz zu erarbeiten⁸¹⁵. Dies erfordere in der Konsequenz Anpassungen der Netzleittechnik sowie einen koordinierten Netzschutz und Wiederanfahrstrategien für die Stromnetze⁸¹⁶.

Zusätzlich zur Automatisierung der technischen Ebene basiere die erfolgreiche Umsetzung eines Smart Grids auf der Verknüpfung technischer Operationen, betrieblicher Abläufe und geschäftlicher Transaktionen. Es ist die technologische Umsetzung eines „Smart Markets“. Zu diesen Themen benennen die Akteure in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren viele Ansätze für den künftigen Forschungsbedarf. So wird insbesondere die Entwicklung von Konzepten, Methoden und technischen Frameworks für systemübergreifende Dienstplattformen mehrheitlich als wichtige Heraus-

⁸⁰⁵ [A1]; [A3]; [C7]; [E6]; [F1]; [F3]; [G1]; [H9] (AG5)

⁸⁰⁶ [A1]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸⁰⁷ [E6]; [F2]; [F3]; [H9] (AG1/AG4)

⁸⁰⁸ [A1]; [A3]; [C7]; [E6]; [F2]; [F3]; [H9] (AG1/AG5)

⁸⁰⁹ [A3]; [C7]; [H9] (AG5); [I1]

⁸¹⁰ [A1]; [C7]; [E6]; [F2]; [F3]; [H9] (AG1/AG2)

⁸¹¹ [H9] (AG5)

⁸¹² [A1]; [A3]; [C4]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸¹³ [A1]; [A3]

⁸¹⁴ [H9] (AG5)

⁸¹⁵ [H9] (AG2/AG3); [E6]

⁸¹⁶ [H9] (AG3)

forderung eingeschätzt⁸¹⁷. Besonderer Forschungsbedarf bestehe unter anderem bezüglich der Plug&Play-Einbindung von Feldgeräten, der verteilten Speicherung operationaler Daten, der diskriminierungsfreien Bereitstellung von Energie- und Flexibilitätsprodukten, der Analyse von Fehlersituationen und Cyberangriffen, dem notwendigen Datenumfang, Data-Ownership sowie des automatisierten Daten-Lebenszyklus⁸¹⁸. Ebenso sei eine verbesserte Netzintegration von Erzeugern, Speichern und Verbrauchern inklusive passender Managementkonzepte zur Erbringung von SDL für die technologische Umsetzung des „Smart Markets“ eine wichtige künftige Aufgabe⁸¹⁹. Letztendlich müsse eine Demonstration und Analyse der Auswirkungen des Einsatzes von Flexibilität auf andere Sektoren/Netze und des Effektes der Betriebsoptimierung erfolgen⁸²⁰. Ebenso stellten datenbasierte Optimierungsmethoden für Geschäfts- und technische Abläufe⁸²¹ sowie datenbasierte Energiesystemdienstleistungen und Geschäftsmodelle⁸²² neue Ansätze dar. Des Weiteren kämen die Blockchain-Technologie⁸²³ und Cloud-Anwendungen⁸²⁴ als mögliche Lösungsansätze infrage.

Die entstehenden großen Datenmengen forderten zudem neue Lösungsansätze für die Datenhaltung, -verarbeitung und -auswertung. Ziel seien Konzepte für eine effiziente und resiliente Datenhaltung und ein Datenqualitätsmanagement, die wichtige Punkte wie temporäre Nutzungsrechte, Datenschutz sowie verteilte Datenhaltung berücksichtigen⁸²⁵. Für die Ermittlung von System- und Betriebsmittelzuständen und zur vorausschauenden Instandhaltung sei eine Datenanalyse und -verarbeitung in Echtzeit von hoher Bedeutung⁸²⁶. Um dies zu erreichen, seien weitere Fortschritte in den Bereichen maschinelles Lernen, Deep-Learning, zeitsynchrone Informationen, digitaler Zwilling sowie allgemein „Big Data“ erforderlich⁸²⁷. Außerdem fordern die Akteure, die Interoperabilität zwischen den verwendeten Datenmodellen und den Schnittstellenprotokollen⁸²⁸. Aufbauend auf einer Datenverarbeitung in Echtzeit seien Kommunikationsstrategien und -technologien für eine Datenübertragung in gleicher Geschwindigkeit zu entwickeln⁸²⁹.

Um in Zukunft die bisherige Versorgungsqualität im Netz halten zu können, sei eine umfassende Analyse des Strommarktes, der Netzstrukturen und des Energiesystems als Ganzes notwendig. Dies solle im Rahmen von Simulationen geschehen. Hierbei dürften nicht nur die bekannten Teilnehmer des Stromsektors mit einbezogen werden, sondern alle Sektoren, wie Strom, Wärme, (Luft-)Verkehr, die damit verbundenen Technologien und ebenso die relevanten Kosten der Stakeholder⁸³⁰. Besonderes Augenmerk falle in diesem Zusammenhang auf die Möglichkeit zum netzdienlichen Betrieb und zum Systemwiederaufbau durch die Einbindung aller Sektoren. Dazu kämen verteilte Erzeuger bzw. zentrale und dezentrale Intelligenz, Power-to-X, Elektromobilität, Wärmepumpen und Speicher infrage. So seien Betrachtungen zur technisch und ökonomischen Optimierung/Entwicklung, z. B. Wirkungs-

⁸¹⁷ [A3]; [C2]; [C4]; [C7]; [E6]; [F1]; [H9] (AG5)

⁸¹⁸ [A3]; [C2]; [C4]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸¹⁹ [A3]; [H9] (AG2)

⁸²⁰ [A1]; [A3]; [C8]; [E6]; [E7]; [F1]; [H9] (AG4)

⁸²¹ [A1]; [A3]; [E6]; [H9] (AG5)

⁸²² [A1]; [A2]; [A3]; [C4]; [C7]; [E6]; [F1]; [H9] (AG5)

⁸²³ [A1]

⁸²⁴ [C4]

⁸²⁵ [A3]; [C2]; [C4]; [H9] (AG5)

⁸²⁶ [A1]; [A3]; [C4]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸²⁷ [A3]; [E6]

⁸²⁸ [H9] (AG5)

⁸²⁹ [C7]; [H9] (AG5)

⁸³⁰ [C2]; [C3]; [E6]; [F1]; [F2]; [F3]; [H9] (AG1/AG4)

grad, Lebensdauer, von Power-to-X Technologien als Schnittstelle zwischen Infrastrukturen und Speichern wichtige Bestandteile zukünftiger Forschung⁸³¹.

Des Weiteren weisen die Akteure auf die notwendige Anpassung der Planungsgrundsätze und -methoden hin. Bestehende Ansätze und Konzepte zum Systemverhalten, z. B. Instabilitäten, Optimierung, Netzdienlichkeit, Interoperabilität, Netzwiederaufbau, Kommunikationsabhängigkeit, Oberschwingungen, müssten überprüft bzw. ergänzt werden. Gleiches beträfe die Netzstruktur, die sich in Abhängigkeit der Spannungsebene von einem reinen AC- zu einem hybriden AC/DC- bzw. reinen DC-Netz wandeln könne. Hieraus ergäben sich wiederum konkrete aktuelle Anforderungen an die Simulationswerkzeuge, Netznutzer und Komponenten⁸³². Die neuen Anforderungen und Strukturen könnten auch aufgrund eines veränderten Aufgabenfeldes zu neuen Rollenverständnissen führen. Daher seien Standards zur gesellschaftlichen und technischen Bewertung von Energieversorgungszenarien erforderlich, um künftig auch Akzeptanz und rechtliche Fragestellungen zu erfassen⁸³³.

Im Verlauf des Konsultationsprozesses benannten die Akteure weiterhin die Neu- und Weiterentwicklung von Übertragungstechnologien und Komponenten sowie die Erarbeitung entsprechender Prüfanforderungen, z. B. Hardware-in-the-loop, als wichtige Themen für das neue Energieforschungsprogramm⁸³⁴. Diese setze die Aktivitäten des laufenden Programms fort. Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Stromrichtern im Netz erweitere sich die technologiespezifische Forschung um die Weiterentwicklung und Optimierung der Stromrichterkomponenten sowie um Konzepte, Topologien und Überwachungs- und Testverfahren für Stromrichtersysteme (Schutz, Stabilität)⁸³⁵.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Mögliche Markthürden bestünden in der Gestaltung des Ordnungsrahmens, der Netzanschlussbedingungen sowie bei Normen und Prüfverfahren für technische Neuerungen. Zudem hemme die Anreizregulierung Investitionen in innovative Netztechnologien und verhindere damit Effizienzfortschritte⁸³⁶. Regulatorische Hürden gebe es sowohl für Energiespeicher und deren Integration als auch für Technologien zur Sektorkopplung⁸³⁷. Darüber hinaus sei eine themen- und technologieoffene Forschung und Entwicklung sicherzustellen⁸³⁸. Das größte Entwicklungshemmnis sehen die Akteure in der noch fehlenden Akzeptanz gegenüber neuen Technologien⁸³⁹.

Des Weiteren würde eine Verminderung der internationalen Zusammenarbeit bzgl. Standards und Normen die Einbettung des deutschen Energieversorgungssystems in das europäische Umfeld erschweren⁸⁴⁰.

⁸³¹ [A1]; [A2]; [B2]; [C4]; [C5]; [C7]; [C9]; [E6]; [F2]; [F3]; [H9] (AG1/AG2/AG4)

⁸³² [F3]; [H9] (AG1/AG2/AG3/AG4)

⁸³³ [A1]; [B2]; [C4]; [F1]; [H9] (AG1/AG2/AG4)

⁸³⁴ [H9] (AG2/AG3)

⁸³⁵ [H9] (AG1/AG2)

⁸³⁶ [A2]; [C4]; [H9] (AG2)

⁸³⁷ [C4]; [C8]

⁸³⁸ [C2]; [C4]; [C8]

⁸³⁹ [H9] (AG1/AG4)

⁸⁴⁰ [C2]; [H9] (AG1)

3.23 Systemanalyse

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Die Energiewirtschaft mit der Bereitstellung, Umwandlung und Nutzung von Energie sei durch lange Investitionszyklen charakterisiert, deren Rentabilität von vielen Einflussgrößen abhängen. Dazu gehören z. B. die Preisentwicklung konventioneller und erneuerbarer Energieträger und der entsprechenden Umwandlungstechnologien, gesamtwirtschaftliche und demographische Entwicklungen sowie politische Rahmenbedingungen. In der Systemanalyse werden diese Einflussfaktoren im Hinblick auf ihre Wirkungen untersucht, sodass Wirtschaft und Politik die Auswirkungen unterschiedlicher Entwicklungen einschätzen und bewerten können. Sie sei damit ein wichtiges Instrument der wissenschaftlichen (Politik-)Beratung, so die Akteure in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren.

Die Systemanalyse als Gegenstand der Forschung habe die Neu- und Weiterentwicklung der eingesetzten Werkzeuge, Methoden und Datenbasen zum Ziel. Die angestrebten Verbesserungen sollen u. a. dazu beitragen, die Ergebnisse der Analysen zu fundieren und die Aussagekraft zu stärken. So gehe mit der stärkeren Verflechtung der Märkte für Strom, Gas, Wärme und Mobilität sowie der zunehmenden Dezentralisierung und Zahl der Beteiligten eine wachsende Komplexität einher. Um diese in der Systemanalyse berücksichtigen zu können, seien fortlaufende Anpassungen erforderlich. Da Ergebnisse von Modellierungsarbeiten meist öffentlichkeitswirksam verbreitet würden und damit auch in politische Entscheidungsprozesse einfließen, seien darüber hinaus Vergleichbarkeit und Transparenz der zugrundeliegenden Annahmen, Daten und Modelle von Bedeutung.

□ Entwicklungsziele

Die Forschung zur Weiterentwicklung der Systemanalyse ist seit langem Bestandteil der Energieforschungsprogramme der Bundesregierung. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Dezentralisierung und Digitalisierung des Energiesystems mit der damit einhergehenden Zunahme verfügbarer Daten und neuer Marktteilnehmer sowie der absehbaren Sektorenkopplung mit neuen Querverbindungen unterschiedlicher Energiemärkte gewinnen nach Ansicht der Akteure folgende, neue Forschungsschwerpunkte an Bedeutung⁸⁴¹. Dabei sei es die Aufgabe der IKT, die unterschiedlichen Anforderungen der beteiligten Fachgebiete und Akteure verbindend zu integrieren.

- Weiter- oder Neuentwicklung von Datenbanken
- Berücksichtigung sozialwissenschaftlicher Fragen in der Modellierung
- Kopplung spezialisierter Teilmodelle
- Vergleichbarkeit und Transparenz von Modellierungsergebnissen
- Verfahren zur Komplexitätsreduktion in der Modellierung⁸⁴²

⁸⁴¹ [H3] (AG1/AG2/AG3)

⁸⁴² [H3] (AG4/AG5)

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Forschungsbedarf bestehe nach den Positionspapieren und Expertenempfehlungen der Akteure u. a. beim Aufbau einer vernetzten, offenen Dateninfrastruktur für energiesystemanalytische Forschungsvorhaben⁸⁴³. Hinzu komme das Bestreben nach einer realitätsnäheren Modellierung des Entscheidungsverhaltens, z. B. Investitionen, Nutzung und Innovationsprozesse, unter Berücksichtigung neuer und heterogener Marktteilnehmer⁸⁴⁴. In diesem Zusammenhang regen die Akteure an, gesellschaftliche Größen in Form von qualitativen Faktoren und quantifizierbaren sozialen Größen in Energiesystemmodellen zu adressieren⁸⁴⁵. Dies sei durch die Integration weiterer Aspekte, wie Kreislaufwirtschaft, LCA, Recycling (als Stoffflussmodelle) und Nutzerverhalten zu ergänzen⁸⁴⁶.

Parallel dazu schlagen die Akteure vor, auch Methoden zur Komplexitätsreduktion und zur vereinfachten Kopplung unterschiedlichster Energiesystemmodelle sowie Definition und Vereinheitlichung der dafür erforderlichen Schnittstellen⁸⁴⁷ zu entwickeln und anzuwenden. Hierunter fielen z. B. auch Forschung zum verbesserten Umgang mit Komplexität durch paralleles Rechnen, Reduktion von Rechenzeit, Modellvereinfachung durch empirische Näherungsverfahren, Anwendung von lernenden Algorithmen (KI) sowie verbesserte Kopplung von Teilmodellen⁸⁴⁸.

Weitere Schwerpunkte, die in den Expertenempfehlungen genannt werden, sind die Entwicklung adaptiver und quantitativer Verfahren zur besseren Berücksichtigung von Unsicherheit und dem Wirken von Marktmechanismen, sowie die Durchführung einheitlicher Sensitivitätsanalysen⁸⁴⁹. Von übergreifendem Charakter ist die Forderung nach Transparenzstandards und von Maßnahmen zur verbesserten Übersicht und zum Vergleich von Modellen sowie zur Bewertung und Verbesserung der Qualität der Modellergebnisse⁸⁵⁰.

Die folgende Tabelle zeigt eine vergleichende Übersicht der Themenschwerpunkte, die aus Sicht der Akteure neu ins Energieforschungsprogramm aufgenommen sowie Förderbereiche, die auf der Basis des laufenden Programms weitergeführt und aktualisiert werden sollten.

⁸⁴³ [H3] (AG1)

⁸⁴⁴ [A1]; [C4]; [H3] (AG2); [I1]

⁸⁴⁵ [H3] (AG2)

⁸⁴⁶ [A1]; [C4]; [H1]; [H3] (AG3)

⁸⁴⁷ [H3] (AG3)

⁸⁴⁸ [H3] (AG5)

⁸⁴⁹ [H3] (AG5)

⁸⁵⁰ [H3] (AG4)

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau von vernetzen, offenen Dateninfrastrukturen • Analyse und Modellierung des Entscheidungsverhaltens neuer und heterogener Marktteilnehmer (Investitionen, Nutzung, Innovationsprozesse) • Erhebung und Abbildung qualitativer und quantitativer sozialer Faktoren in Energiesystemmodellen • Entwicklung von Transparenzstandards und von Maßnahmen zur besseren Vergleichbarkeit von Modellen, Analyseergebnissen und Sensitivitätsanalysen • Anwendung von lernenden Algorithmen (KI) 	<ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung der Modelle um Kreislaufwirtschaft, Lebenszyklusanalyse und Recycling • Verbesserung und Anwendung von Methoden zur Komplexitätsreduktion und zur Kopplung unterschiedlichster Energiesystemmodelle • Weiterentwicklung von Verfahren zur Modellvereinfachung, zur Rechenzeitminimierung und zum parallelen Rechnen • Entwicklung adaptiver und quantitativer Verfahren zur Abbildung von Unsicherheit und Marktmechanismen

Für eine verbesserte Datenverfügbarkeit sei der Aufbau einer vernetzen, frei zugänglichen Dateninfrastruktur für systemanalytische Forschungsvorhaben ein langfristiges Entwicklungsziel. Dabei streben die Akteure eine Linked Open Data Struktur an, wobei auf bestehende Plattformen und Erfahrungen aus anderen Forschungsbereichen zurückgegriffen werden könne. Kurz- bis mittelfristig müssten Konzepte für die Lizenzierung – idealerweise der Kategorie Open Data – und ein Entwurf einer vernetzen Datenbankstruktur einschließlich des Datenqualitätsmanagements entwickelt werden. Zudem seien Standards für maschinenlesbare Metadaten – einschließlich einer gemeinsamen Ontologie, Standards für die Datenablage sowie für offene Schnittstellen in den Modellen erforderlich. Forschungsprojekte könnten darüber hinaus Best-Practice-Beispiele implementieren und entsprechende Leitfäden entwickeln. Diese sollten bei zukünftigen Forschungsprojekten zu einer effektiven Nutzung einer solchen Dateninfrastruktur und zur Weiterentwicklung des Datenbestandes beitragen. Kurzfristig seien Leitfäden zu den Themen „Nutzung von Dateninfrastruktur“, „Open-Data-Lizenzierung“, „Verwendung von Metadaten“ und „Anschluss an Linked Open Data“ zu erarbeiten. Diese können die gewünschten Entwicklungen anstoßen und befördern. Ansätze für die Erstellung einiger Leitfäden lägen bereits vor⁸⁵¹.

Das Verhalten und die Strukturen neuer Marktteilnehmer im Energiesystem, die einen großen Einfluss auf zukünftige Entwicklungen haben, sollten durch interdisziplinäre Arbeiten erhoben und analysiert werden. Dazu müsse die Bandbreite von Modellierungswerkzeugen erhoben und im Hinblick auf Stärken, Schwächen sowie gegebenenfalls fehlende Ansätze analysiert werden, etwa im Bereich der Integration qualitativer Daten. Darauf aufbauend seien für die Weiterentwicklung der Modellierung geeignete Schnittstellen zwischen technikbasierten und sozioökonomischen Modellen zu identifizieren und Methoden zu deren Integration zu entwickeln. Hinzu kämen qualitative und quantitative empirische Erhebungen. Diese sollten von der Analyse der Strategien potenzieller Marktteilnehmer,

⁸⁵¹ [H3] (AG1)

z. B. bei der Nutzung technischer Innovationen und der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, bis zur Erhebung der Routinen und Verhaltensweisen privater Haushalte und Unternehmen im Bereich der Energienachfrage reichen⁸⁵². Einen weiteren Schwerpunkt bildeten zuverlässige Modellierungsparameter für die Bereitstellung von Angebots- und Nachfrageflexibilität. Für die müsse eine fundierte Datenbasis zu den Spezifika der einzelnen Marktteilnehmer und der für sie maßgeblichen organisatorischen und politischen Rahmenbedingungen erarbeitet werden. Die mit der stärkeren Dezentralisierung einhergehenden Einflussmöglichkeiten der Gesellschaft erforderten eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit – zum Teil widersprüchlichen – Kriterien zur Ermittlung gesellschaftlich optimaler Entwicklungspfade. Dies betreffe Fragen der Akzeptanz, Gerechtigkeit und Legitimität, aber auch Chancen und Grenzen von – oftmals neuen Formen – der Partizipation gesellschaftlicher Interessengruppen. Darauf aufbauend müssten diese Kriterien in die Zielfunktionen der Energiemodelle integriert werden⁸⁵³.

In der Energiesystemanalyse würden bisher vorrangig sektorspezifische Transformationspfade untersucht, um z. B. die Möglichkeiten einer zunehmenden Integration erneuerbarer Energien abzuleiten. Mit der stärkeren Verflechtung der Märkte für Strom, Gas, Wärme und Mobilität sowie der zunehmenden Dezentralisierung und Zahl der Marktteilnehmer gehe eine wachsende Komplexität einher. Diese verlange nach einer systemübergreifenden Modellierung⁸⁵⁴, bei der Einzelmodelle an ihre Grenzen kommen könnten. Daher seien Verfahren zur Kopplung von Partialmodellen sowie neue mathematische Optimierungsverfahren erforderlich. Aber auch die Vereinfachung von (Teil-) Modellen sei von Bedeutung, da dadurch Rechenzeiten verkürzt und die Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen gesteigert werden könnten. Eine solche detaillierte, aber dennoch holistische Betrachtung der sektoralen Infrastrukturen zur Energieversorgung und ihrer jeweiligen Interdependenzen könne zu einer besseren Bewertungsbasis für Entscheidungsträger beitragen⁸⁵⁵.

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit und Transparenz in der Energiesystemanalyse empfehlen die Akteure in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren die Entwicklung eines Kriterienkatalogs bzw. Standardrahmens. Dieser solle bei – überwiegend mit öffentlichen Mitteln – geförderten Projekten u. a. durch die verpflichtende Bereitstellung der erhobenen Daten, entwickelten Codes und erarbeiteten Ergebnisse eine gute wissenschaftliche Praxis sicherstellen und die Nachvollziehbarkeit verbessern. Ergänzend dazu sollten verbesserte Modelldarstellungen und -beschreibungen bereitgestellt werden, die verschiedene Perspektiven beinhalten und für Beteiligte mit unterschiedlichem Vorwissen verständlich seien. Auf wissenschaftlicher Ebene könnten ein regelmäßiger Informationsaustausch und Modellvergleiche mit einem Fokus auf Open Data und darauf aufbauender Visualisierung zu einer besseren Transparenz beitragen. Für den damit verbundenen Mehraufwand sei ein Budgetaufschlag beispielsweise im Bereich von 2 bis 5 % erforderlich. Der solle gewährt werden, wenn bestimmte Bedingungen zur Reproduzierbarkeit erfüllt seien, z. B. Datenmanagementplan sowie die Integration von Zusatzinformationen zu Modellen und spezifischen Datensätzen. Im Rahmen von Demonstrationsprojekten solle ein entsprechender Leitfaden erarbeitet werden⁸⁵⁶.

⁸⁵² [A1]; [C4]; [I1]

⁸⁵³ [H3] (AG2); [I1]

⁸⁵⁴ [A1]; [C4]; [I1]

⁸⁵⁵ [H3] (AG3)

⁸⁵⁶ [H3] (AG4)

Es seien ferner Ansätze zum besseren Umgang mit der steigende Komplexität durch zunehmend detailliertere und kleinteiligere Energiesystemmodelle zu entwickeln. Dabei sei einerseits der Umgang mit großen (Roh-)Datenmengen zu verbessern, da Energiesystemmodelle durch verfügbare Rechnerressourcen zunehmend eingeschränkt würden. Hierbei sollten interdisziplinäre Ansätze unter Einbeziehung von Fachexperten der Mathematik und Informatik verfolgt werden, um grundlegende Verbesserungen der Algorithmen von Energiesystemmodellen zu erforschen. Andererseits sei eine sinnvolle Reduktion der Modellkomplexität zu untersuchen. Hierfür sei ein sehr gutes Verständnis der Modellierungsmethoden erforderlich um im Rahmen der Szenarienanalyse die Handhabung von Unsicherheit in den Modellen nachvollziehen zu können. Insbesondere gehe es darum, Sensitivitätsanalysen dahingehend zu verbessern, dass die Robustheit der Ergebnisse quantitativ messbar und damit auch zwischen Modellen vergleichbar werde. Ferner seien übergreifende neue Ansätze zur Komplexitätsreduktion durch neue Berechnungs- und Bewertungsverfahren zu verfolgen. Hierzu zählten beispielsweise die Anwendung selbstlernender Algorithmen („Künstliche Intelligenz“) sowie ein besseres Verständnis für die Abbildung des Akteursverhaltens⁸⁵⁷.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Akteure thematisieren in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren zur Systemanalyse keine technikspezifischen Entwicklungshemmnisse. Allerdings beeinflussten u. a. Urheberrecht und Lizenzierung die Möglichkeiten und Grenzen der freien Daten- und Softwareverfügbarkeit.

Markthürden spielten eine untergeordnete Rolle, da die Systemanalyse vorrangig im akademischen Bereich angesiedelt sei.

⁸⁵⁷ [H3] (AG 5)

3.24 IKT und Digitalisierung

□ Energiewirtschaftliche und industriepolitische Bedeutung

Die Digitalisierung des Energiesystems ermögliche notwendige Weiterentwicklungen und Fortschritte in zentralen Bereichen der Energiewende, nämlich der regenerativen Energieerzeugung und der Steigerung der Energieeffizienz.

Aufgrund des bisherigen und künftigen Zuwachses an fluktuierenden Energieerzeugungsanlagen und der damit einhergehenden steigenden Anzahl neuer Marktteilnehmer und Komponenten, z. B. Prosumer, Aggregatoren, Speicher, Elektromobile und Technologien zur Sektorkopplung, steige die Komplexität des Energiesystems signifikant an. Der sichere und effiziente Betrieb dieses komplexen Systems erforderte bereits jetzt die Unterstützung durch IKT-Konzepte und -Technologien, so die Akteure in den Expertenempfehlungen und Positionspapieren⁸⁵⁸.

Weiterhin gebe es auch die Chance, durch IKT-Lösungen Effizienzsteigerungen im industriellen und privaten Bereich sowie der konventionellen Kraftwerkstechnik zu erreichen⁸⁵⁹. Neben den energiepolitisch positiven Effekten eines verminderten Energieverbrauchs ermöglichten datenbasierte Automatisierungsverfahren und neuartige Diagnose- und Prognoseverfahren auch eine Steigerung der Produktqualität und der Kosteneffizienz⁸⁶⁰. Das stärke die Position deutscher Unternehmen im internationalen Wettbewerb. Aus wirtschaftlicher Perspektive seien zudem die entwickelten IKT-Produkte selbst durch ihre hohe Skalierbarkeit ganz besonders für den Export geeignet⁸⁶¹.

Bei allen Innovationsmöglichkeiten durch Digitalisierung sei stets den hohen Ansprüchen an Datenverfügbarkeit, Datensicherheit und Datenschutz nachzukommen⁸⁶². Neben der Sicherung der kritischen Infrastruktur „Energiesystem“ sei insbesondere die Akzeptanz der verschiedenen Nutzergruppen ein wichtiger Aspekt⁸⁶³.

Aufgrund der oben geschilderten vielseitigen Einsatzmöglichkeiten von IKT-Technologien und Konzepten berühre deren Anwendung und Weiterentwicklung alle Bereiche der Energieforschung. Damit stelle „IKT und Digitalisierung“ ein wichtiges, interdisziplinäres Technologiefeld dar.

⁸⁵⁸ [A3]; [B1]; [B2]; [C7]; [E6]; [F2]; [F3]; [H9] (AG5); [H10]

⁸⁵⁹ [C7]; [H2]; [H4]; [H8] (AG1/AG3)

⁸⁶⁰ [H8] (AG1/AG3/AG5)

⁸⁶¹ [C7]

⁸⁶² [E7]; [H9] (AG5)

⁸⁶³ [E7]; [H4]

□ Entwicklungsziele

- Methoden, Konzepte und Algorithmen zur Automatisierung, zum Energie- und Leistungsmanagement und zur Digitalisierung des Energiesystems (kurz- bis langfristig)⁸⁶⁴
- Methoden, Konzepte und IT-Werkzeuge für Datenhaltung, -verarbeitung und -auswertung (mittelfristig; ab 5 Jahre)⁸⁶⁵
- Methoden, Konzepte und IT-Frameworks zur Verknüpfung technischer Operationen, betrieblicher (Produktions-)Abläufe und (neuer) geschäftlicher Transaktionen (mittelfristig; bis 5 Jahre)⁸⁶⁶
- IKT-Sicherheit, Resilienz und Autonomie (kurz- bis langfristig)⁸⁶⁷

□ Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Die Expertenempfehlungen und Positionspapiere zum Themenfeld Digitalisierung umfassen viele neue Forschungsbereiche, deren Förderung im neuen, 7. Energieforschungsprogramm als wichtig erachtet wird. Außerdem gibt es eine Reihe bewährter Förderthemen aus dem laufenden Programm, die fortgeführt werden sollten. Beide sind in der folgenden Tabelle gegenübergestellt.

Die durchgängige informatorische Vernetzung innerhalb des gesamten Energiesystems bilde die Grundlage der effizienten Nutzung digitaler Lösungen. Neue Herausforderungen ergäben sich insbesondere aus dem angestrebten Umfang der Vernetzung, welche alle Energiesektoren sowie unterschiedlichste (Industrie-)Komponenten und Anlagen, Kraftwerken und Prosumer umfassen sollte⁸⁶⁸. Dabei sei die Standardisierung der IT-Anbindung von Komponenten und Netzteilnehmern, z. B. zur Ermöglichung einer Plug&Play-Einbindung, von höchster Bedeutung⁸⁶⁹.

⁸⁶⁴ [H9] (AG5)

⁸⁶⁵ [H9] (AG5)

⁸⁶⁶ [A2]; [C7]; [H7] (AG 2); [H9] (AG5)

⁸⁶⁷ [E6]; [F3]; [H9] (AG5)

⁸⁶⁸ [A2]; [A3]; [C2]; [E7]; [H8] (AG1); [H9] (AG2/AG5)

⁸⁶⁹ [A1]; [A3]; [B2]; [C7]; [H4] (AG7); [H9] (AG4/AG5)

Neue Forschungsbereiche für das 7. Energieforschungsprogramm	Forschungsbereiche des 6. Energieforschungsprogramms, die weiterentwickelt werden sollen
<ul style="list-style-type: none"> • Informationstechnische Vernetzung innerhalb des gesamten Energiesystems, insbesondere über Sektorgrenzen hinaus • Standardisierung der IT-Anbindung von Komponenten und Netzteilnehmern • Datenschutz bzw. Anonymisierungsverfahren, Datensicherheit, temporäre Nutzungsrechte sowie verteilte Datenhaltung • Echtzeitfähige und zeitsynchrone Datenverarbeitung großer Datenmengen • Automatisierte, selbstlernende Verarbeitung und Auswertung großer Datenmengen • Entwicklung von systemübergreifenden Dienstplattformen • Weiterentwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen • Erhöhung der Systemzuverlässigkeit trotz und durch IKT (u. a. Security-by-Design, automatische Fehlererkennung, dezentrale Ansätze) und Stabilität der IKT-Infrastruktur bei Störungen • Wirksamkeit von IKT-Sicherheitsmaßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Erprobung von sicheren Informations- und Kommunikationstechnologien (inklusive Messtechnik) zur Vernetzung von Netzbetriebsmitteln, Quellen und Senken für einen flexiblen Netzbetrieb • Automatisierung und Qualitätssicherung im Energiesystem und in der Produktion • Erhebung und systematische Auswertung von Daten • Zusammenstellung von Referenzdatensätzen und Harmonisierung von Modellen • Numerische Modellierung und Simulation sowie die Verwendung mathematisch-physikalischer Verfahren und Algorithmen zur Analyse, Vorhersage und Optimierung von Prozessen (inklusive Lebensdauervorhersage) • Systemsicherheit sowie Kommunikations- und Datensicherheit in intelligenten Netzen

In einem nächsten Schritt sollten diese innovativen IKT-Lösungen zur Automatisierung von Prozessen im gesamten Energiesystem⁸⁷⁰ und im Rahmen von Industrie 4.0⁸⁷¹ genutzt werden.

Diese informationstechnische Erschließung des gesamten Energiesystems ermögliche die Erhebung großer Mengen an Daten („Big Data“). Der Austausch, die effiziente Speicherung und das Qualitätsmanagement für diese großen Datenmengen stellen weitere technologische Herausforderungen dar. Dabei gebe es besonderen Forschungsbedarf in den Bereichen Datenschutz bzw. Anonymisierungsverfahren, Datensicherheit, temporäre Nutzungsrechte sowie verteilte Datenhaltung⁸⁷². In einer kritischen Infrastruktur wie dem Energiesystem bestünden zudem außerordentlich hohe Anforderungen an die Reaktionszeit solcher Lösungen. Daher seien ebenfalls Konzepte für echtzeitfähige und zeitsynchrone Datenverarbeitung⁸⁷³ sowie für den Datenaustausch⁸⁷⁴ zu entwickeln.

⁸⁷⁰ [A1]; [A2]; [C4]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸⁷¹ [A1]; [H9] (AG4)

⁸⁷² [A3]; [C2]; [C4]; [E7]; [H4] (AG1/AG3/AG5/AG7/AG8); [H9] (AG5)

⁸⁷³ [A1]; [C4]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸⁷⁴ [C7]; [H9] (AG5)

Eine besondere Herausforderung bestehe in der automatisierten, selbstlernenden Verarbeitung und Auswertung der Daten, z. B. „Big Data“, maschinelles Lernen, „Deep Learning“⁸⁷⁵. Im Bereich der computergestützten Simulationsverfahren werden insbesondere die Vereinheitlichung von Datenmodellen und Schnittstellen⁸⁷⁶ und die Vereinheitlichung und Zusammenlegung von Datenpools genannt⁸⁷⁷.

Die Entwicklung von systemübergreifenden Dienstplattformen⁸⁷⁸ und neuen, datenbasierten Services⁸⁷⁹ könnten es ermöglichen, den o. g. Fortschritt in der Datenverarbeitung zu erreichen. Im Bereich der Dienstplattformen liege der technologische Forschungsbedarf u. a. in der diskriminierungsfreien Bereitstellung von digitalen Produkten, der Analyse von Fehlersituationen und Cyberangriffen (Resilienz), dem notwendigen Datenumfang, Data Ownership sowie automatisierten Datenlebenszyklen⁸⁸⁰. Im Bereich der datenbasierten Services sei es das Ziel, insbesondere automatisierte Diagnose- und Prognoseverfahren zur zustandsorientierten Instandhaltung bzw. Wartung zu entwickeln, z. B. „Predictive Maintenance“, „Digitaler Zwilling“⁸⁸¹. Aber auch die Realisierung von intelligenten Planungs- und Konstruktionshilfen⁸⁸², neuartigen Energiesystemdienstleistungen⁸⁸³ sowie neuen Optimierungsmethoden für technische Produktions- (Industrie 4.0) und Geschäftsabläufe⁸⁸⁴ stellten technologische Herausforderungen dar.

Für die effektive Nutzung der entwickelten Services und Tools erhalte die Entwicklung nutzerfreundlicher Mensch-Maschine-Schnittstellen, z. B. Datenbrillen und Visualisierungen, eine deutlich stärkere Bedeutung⁸⁸⁵.

Mit der steigenden Digitalisierung des Energiesystems stiegen die Ansprüche an die IKT-Sicherheit und Resilienz. Um IKT-Sicherheit zu gewährleisten, solle diese sowohl beim Aufbau als auch beim Betrieb neuer Systeme und Komponenten mitberücksichtigt werden. Dies betreffe Security-by-Design, Verfügbarkeit, Risikoanalysen und die Intrusion-Detection⁸⁸⁶. Zudem seien bestehende Verfahren und Protokolle kontinuierlich weiterzuentwickeln⁸⁸⁷.

Um die Sicherung und die Erhöhung der Systemzuverlässigkeit (Resilienz) trotz und durch IKT zu erreichen, sei u. a. notwendig, die automatische Fehlererkennung, Selbstheilungsmechanismen und den Weiterbetrieb bei (Teil-) Ausfällen der IKT und zur Nutzung dezentraler Ansätze stärker zu erforschen⁸⁸⁸. In diesem Rahmen sei insbesondere die Stabilität der IKT-Unterstützung bei kleinen und großen unerwarteten Störungen stärker zu untersuchen⁸⁸⁹.

⁸⁷⁵ [A1]; [A2]; [A3]; [C4]; [C7]; [H4] (AG2/AG3/AG5); [H7] (AG 2); [H8] (AG1/AG3); [H9] (AG5)

⁸⁷⁶ [H4] (AG3); [H9] (AG5)

⁸⁷⁷ [H4] (AG3/AG5/AG9)

⁸⁷⁸ [A3]; [C2]; [C4]; [C7]; [H4] (AG7); [H9] (AG5)

⁸⁷⁹ [A1]; [A2]; [A3]; [C7]; [H4] (AG3/AG5); [H7] (AG 2); [H8] (AG1/AG3/AG5); [H9] (AG4/AG5)

⁸⁸⁰ [C2]; [C4]; [C7]; [H4] (AG7); [H9] (AG5)

⁸⁸¹ [A1]; [A2]; [C7]; [H7] (AG 2); [H8] (AG1); [H9] (AG5)

⁸⁸² [H4] (AG3/AG5)

⁸⁸³ [A1]; [A2]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸⁸⁴ [A1]; [H8] (AG3/AG5); [H9] (AG4/AG5)

⁸⁸⁵ [A1]; [C7]; [H9] (AG5)

⁸⁸⁶ [A1]; [C4]; [C7]; [H8] (AG1); [H9] (AG5)

⁸⁸⁷ [A1]; [H9] (AG5)

⁸⁸⁸ [A1]; [A2]; [C7]; [H9] (AG1/AG5); [I1]

⁸⁸⁹ [C7]; [H9] (AG5); [I1]

Eher grundlegendere Natur sei die Notwendigkeit, Kriterien zur Bewertung der Wirksamkeit von IKT-Sicherheitsmaßnahmen⁸⁹⁰ sowie von Methoden zur allgemeinen Bewertung der Sicherheit von kritischen Infrastrukturen⁸⁹¹ zu erarbeiten.

□ Technikspezifische Entwicklungshemmnisse und Markthürden

Die Akteure sehen als wichtigstes Hemmnis und Hürde für die Entwicklung von neuen Technologien und Konzepten den restriktiven regulatorischen Rahmen⁸⁹². Zudem bestehe eine geringe Verankerung des Themas „Energieinformatik“ in der anwendungsorientierten Forschungslandschaft⁸⁹³.

Als Hürden für die Neueinführung von Produkten im Energie- und IKT-Sektor⁸⁹⁴ erwiesen sich unterschiedliche Standards und Normen für die Einführung neuer Geschäftsmodelle und Services sowie der zumeist proprietäre und geschlossene Charakter von bereits verfügbaren Dienstplattformen und Schnittstellen⁸⁹⁵. Des Weiteren führten Akzeptanzprobleme in vielen Fällen dazu, dass bestehende Komponenten oder komplette Systeme teilweise oder sogar vollständig außer Betrieb genommen würden bzw. vielversprechende Innovationen keine Verbreitung am Markt erlangten⁸⁹⁶.

⁸⁹⁰ [H9] (AG5)

⁸⁹¹ [A1]; [C7]; [H9] (AG1)

⁸⁹² [A1]; [A2]; [A3]; [C4]; [C7]

⁸⁹³ [C7]

⁸⁹⁴ [H9] (AG5)

⁸⁹⁵ [H9] (AG5)

⁸⁹⁶ [E7]; [H4]

4. Quellenverzeichnis

A Bundesländer

- [A1] Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland: Frankfurter Protokoll - Regionalkonferenz der Länder Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland zum 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, ohne Datum.
- [A2] Norddeutsche Wissenschaftsministerkonferenz der Länder Schleswig-Holstein, Bremen, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Hamburg (NWMK): NWMK-Papier zur Norddeutschen Energieforschung, August 2017.
- [A3] Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: Anmerkungen zum 7. Energieforschungsprogramm, Februar 2018.
- [A4] Sächsisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst: Anmerkungen zum 7. Energieforschungsrahmenprogramm, November 2017.
- [A5] Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft / Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz: Stellungnahme zum 7. Energieforschungsprogramm, Dezember 2017.

B Landesagenturen

- [B1] e-mobil BW GmbH, Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg: Eingabe der e-mobil BW in das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Oktober 2017.
- [B2] Energieforschungsverbund Hamburg (EFH) und das Cluster erneuerbare Energien Hamburg (EEHH): Positionspapier des Energieforschungsverbundes Hamburg (EFH) und des erneuerbare Energien Hamburg Clusters (EEHH) im Rahmen des Konsultationsprozesses zum 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, November 2017.

C Verbände

- [C1] Biotechnologie-Industrie-Organisation Deutschland e. V. (BIO Deutschland): Positionspapier der BIO Deutschland -Industrielle Bioökonomie verwirklichen, Mai 2016.
- [C2] Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. BDI: Strukturelle Anforderungen der deutschen Industrie an das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Juli 2017.
- [C3] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft e.V. (BDL): Stellungnahme des BDL zur Rolle strombasierter Kraftstoffe im Luftverkehr, ohne Datum.
- [C4] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): Positionspapier Energieforschungspolitik, Mai 2017.
- [C5] Bundesverband Energiespeicher e.V. (BVES): BVES-Positionspapier zum siebten Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Oktober 2017.
- [C6] Bundesverband Geothermie e. V. (BVG): Stand und Forschungsbedarf in der Geothermie – Positionspapier des Bundesverbandes Geothermie e. V. (BVG) zum 7. Energieforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Kurzfassung, November 2017.
- [C7] Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien e.V. (bitkom): Stellungnahme: Empfehlungen für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung - Mit der Digitalisierung in die nächste Phase der Energiewende starten, November 2017.

[C8] Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI): Anforderungen des VCI an das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Mai 2017.

[C9] Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI): Grundlagen zur Markteinführung von Stromspeichern aus Sicht der chemischen Industrie, v 1.1, Juli, 2017.

D Unternehmen

[D1] STEAG GmbH: Anforderung an die Forschung und Entwicklung im Energiebereich, November 2017.

[D2] Umicore AG und Co. KG: Umicore Empfehlungen für das 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.

E Kompetenzcluster, Plattformen und sonstige Verbände

[E1] FVEE ForschungsVerbund Erneuerbare Energien: Empfehlungen des ForschungsVerbunds erneuerbare Energien für die Forschungsförderung im Bereich Photovoltaik, ohne Datum.

[E2] Hydrogen Power Storage und Solutions East Germany e.V. (HYPOS): Umsetzung Klimaschutzplan 2050: Maßnahmenprogramm "INDUSTRIE" - Investitionskosten für die Strombasierte Wasserstofftechnik, November 2017.

[E3] Hydrogen Power Storage und Solutions East Germany e.V. (HYPOS): Umsetzung Klimaschutzplan 2050: Maßnahmenprogramm "INDUSTRIE", Juli 2017.

[E4] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Kurzes Themenpapier zur Konsultation 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung mit Fokus Traktionsbatterien, Dezember 2017.

[E5] Positionspapier Start-ups: Energieforschungsförderung – Positionspapier von Startups aus der Energiebranche, August 2017.

[E6] Thüringer erneuerbare Energien Netzwerk (ThEEN) e.V.: Positionspapier zum 7. Energieforschungsprogramm des BMWi, Dezember 2017.

[E7] Zivilgesellschaftliche Plattform Forschungswende, Vereinigung Deutscher Wissenschaftler (VDW e.V.): Kernforderungen für das 7. Energieforschungsrahmenprogramm, Dezember 2017.

F Akademien und Forschungsorganisationen

[F1] Deutsche Wissenschaftsakademien (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften): Impulse für das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung - Positionspapier, Januar 2018.

[F2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Programmdirektion Energie: Positionspapier zum 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Dezember 2017.

[F3] Forschungsbereich Energie der Helmholtz-Gemeinschaft: Schwerpunkte und Impulse für das 7. Energieforschungsprogramm, Dezember 2017.

G Forschergruppen

[G1] Fachgebiet für Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechnologien regenerativer Energien der TU Berlin: Stellungnahme Technologiesteckbriefe für das 7. Energieforschungsprogramm des BMWi vom Fachgebiet Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien, ohne Datum.

H Forschungsnetzwerke

- [H1] Forschungsnetzwerk Bioenergie: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.
- [H2] Forschungsnetzwerk Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, November 2017.
- [H3] Forschungsnetzwerk Energiesystemanalyse: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.
- [H4] Forschungsnetzwerk Energiewendebauen: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Januar 2018.
- [H5] Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen Photovoltaik für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.
- [H6] Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien, Arbeitsgruppe Photovoltaik: Exzellente Produktions-Technologie für Photovoltaikmodule und Systemkomponenten in Deutschland - Strategiepapier für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Januar 2018.
- [H7] Forschungsnetzwerk Erneuerbare Energien: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen Windenergie für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.
- [H8] Forschungsnetzwerk Flexible Energieumwandlung: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.
- [H9] Forschungsnetzwerk Stromnetze: Expertenempfehlungen aus den Arbeitsgruppen für den Konsultationsprozess zum 7. Energieforschungsprogramm, Oktober 2017.
- [H10] Forschungsbereich Brennstoffzellen / Statusseminar Brennstoffzellen / Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Forschungs- und Entwicklungsbedarf Brennstoffzellentechnologie, Juli 2017.

I Leitprojekte Energieforschung

- [I1] ifo Institut - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München e.V.: Onlineumfrage in den Forschungsnetzwerken Energie vom Frühjahr 2017, Juni 2017.