

# ECKPUNKTE UND LEITLINIEN ZUR WEITERENTWICKLUNG DER ENERGIEFORSCHUNGSPOLITIK DER BUNDESREGIERUNG

EMPFEHLUNGEN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

im Auftrag des Bundesministeriums  
für Wirtschaft und Technologie

# **ECKPUNKTE UND LEITLINIEN ZUR WEITERENTWICKLUNG DER ENERGIEFORSCHUNGSPOLITIK DER BUNDESREGIERUNG**

EMPFEHLUNGEN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT

im Auftrag des Bundesministeriums  
für Wirtschaft und Technologie

# VORWORT

## Liebe Leserinnen und Leser,

die Versorgung unserer Gesellschaft, der Bevölkerung und der Wirtschaft, mit Energie ist die zentrale Herausforderung für unsere Zukunft. Wir stehen dabei vor zwei eng miteinander zusammenhängenden Problemen, unserer Abhängigkeit von ausreichender und bezahlbarer Energie einerseits und der Gefährdung unserer natürlichen Lebensgrundlagen durch die Auswirkungen des Energieverbrauchs andererseits. An die Energieforschung richtet sich deshalb die Erwartung, die Grundlagen und Technologien zu entwickeln, die beide Herausforderungen gleichzeitig lösen. Doch damit nicht genug: Wie wir unsere Energie bereitstellen und nutzen ist auch eine geostrategische und weltanschauliche Frage, so dass wir nicht nur vor einer großen wissenschaftlich-technischen Herausforderung stehen, sondern uns auch in einem spannungsgeladenen politischen Umfeld bewegen.

Wir nehmen diese Herausforderung an. Wir sind davon überzeugt, dass in Deutschland die erforderlichen Voraussetzungen vorhanden sind, um in der Energieforschung eine internationale Vorreiterrolle zu spielen. Ein wesentlicher Teil dieser Fachkompetenz ist in der Helmholtz-Gemeinschaft gebündelt. Als Deutschlands größte Forschungsorganisation, in der etwa 50 Prozent der öffentlich geförderten Energieforschung betrieben wird, forschen wir an nahezu allen wichtigen Optionen der Energieerzeugung und -nutzung. Zudem ermöglichen es unsere Kompetenzen in komplementären Forschungsgebieten wie Geo- und Umweltwissenschaften, Systemanalyse und Technikfolgenabschätzung, das Thema Energie nicht nur breit, sondern vor allem auch mit einem ganzheitlichen, systemischen Ansatz anzugehen.

Wir danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie für den Auftrag, diese Kompetenzen in die Weiterentwicklung der Energieforschungspolitik der Bundesregierung einzubringen und begreifen unsere Empfehlungen als Auftakt zu einem fruchtbaren Dialog mit unseren Partnern in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft.



Prof. Dr. Jürgen Mlynek  
Präsident der Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren



Prof. Dr. Eberhard Umbach  
Vizepräsident der Helmholtz-Gemeinschaft für den  
Forschungsbereich Energie und Vorstandsvorsitzender  
des Forschungszentrums Karlsruhe

# INHALTSVERZEICHNIS

1. Auftrag.....	7
2. Herausforderungen für eine nachhaltige Energieversorgung im 21. Jahrhundert.....	8
2.1 Zur Situation im globalen Rahmen .....	8
2.2 Nachhaltige Energieversorgung in Deutschland .....	9
3. Grundsätze für eine effiziente staatliche Förderpolitik von Forschung und Entwicklung im Energiebereich ..	12
3.1 Schwerpunktbildung der Forschungsförderung.....	12
3.2 Komplementarität der Forschungsförderung und Kooperation .....	13
3.3 Langfristige Förderungsstrategien .....	13
4. Technologieentwicklung und Forschungsprioritäten im Energiebereich .....	15
4.1 Stromversorgung der Zukunft .....	16
4.1.1 Langfristige Perspektiven.....	16
4.1.2 Wichtige Technologielinien.....	17
4.1.3 Resümee .....	23
4.2 Mobilität der Zukunft .....	23
4.2.1 Elektrifizierung und Hybride.....	24
4.2.2 Optimierung vorhandener Technologien.....	26
4.2.3 Alternative Kraftstoffe.....	26
4.2.4 Informations- und Kommunikationstechnologien .....	28
4.2.5 Systemanalytische Begleitforschung.....	28
4.3 Wärme- und Kälteversorgung der Zukunft.....	29
4.3.1 Steigerung der Nutzungseffizienz.....	29
4.3.2 Erneuerbare Energien für die Wärme- und Kältebereitstellung.....	31
4.3.3 Rahmenbedingungen .....	32
5. Politische Steuerung, Evaluierung und Forschungsinfrastruktur .....	34
5.1 „Energieforschungspolitik aus einem Guss“ .....	34
5.2 Bewertung der Forschungsstrukturen im Energiebereich .....	35
5.3 Bessere Verzahnung universitärer und außeruniversitärer Forschung .....	35
5.4 Förderung großer Forschungsinfrastruktur .....	36
5.5 Vernetzung auf europäischer (internationaler) Ebene .....	36
5.6 Anwendungsoffene Forschung.....	37
5.7 Zur Rolle der sozioökonomischen Forschung im Bereich Energie .....	37
6. Positionierung im internationalen Umfeld.....	39
6.1 Europäischer Forschungsraum.....	39
6.2 Strategische internationale Kooperationen .....	40
7. Zusammenfassung und Empfehlungen für die Weiterentwicklung .....	41
7.1 Empfehlungen zum Thema Stromversorgung.....	41
7.2 Empfehlungen zum Thema Mobilität .....	43
7.3 Empfehlungen zum Thema Wärme- und Kälteversorgung .....	43
7.4 Empfehlungen zum Thema sozioökonomische Begleitforschung.....	43
7.5 Forschungspolitische Handlungsempfehlungen .....	44
Koordination und Autoren .....	46

# 1. AUFTRAG

Energiepolitik hat die verantwortungsvolle Aufgabe, den Rahmen für ein nachhaltiges, d.h. dauerhaft zukunftsfähiges Energiesystem zu gestalten. Dieses soll wirtschaftlich und sicher sowie klima- und umweltverträglich sein. Auf globaler Ebene soll es zudem einen gerechten Zugang zu Energie bieten. Als drittgrößte Industrienation der Welt ist Deutschland dringend auf eine sichere und kostengünstige Energieversorgung angewiesen, und als verantwortungsbewusster globaler Akteur verfolgt es konsequent das Ziel eines klima- und umweltfreundlichen Umgangs mit Energie. Die hierfür erforderlichen Verbesserungen und Änderungen lassen sich nur mit Spitzenleistungen in der Erforschung und Entwicklung von Energietechnologien erreichen.

Die vergangenen Jahre waren durch dynamische Entwicklungen im Energiesektor gekennzeichnet, speziell auch im technischen Bereich. Konsequenterweise hat die Bundesregierung begonnen, das 5. Energieforschungsprogramm aus dem Jahr 2005 weiterzuentwickeln. Es gilt, die Grundlagen für die Technologien von morgen zu schaffen und mit Innovationen dafür zu sorgen, dass Deutschland gestärkt aus der derzeitigen Krise hervorgeht. Energietechnologien können hierbei eine herausragende Rolle spielen.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Energieforschungspolitik hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie einen Konsultationsprozess gestartet. Innerhalb dieses Prozesses wurde die Helmholtz-Gemeinschaft als größte Forschungsorganisation Deutschlands und auch als die Organisation, die mehr als die Hälfte der von der Bundesregierung geförderten Energieforschung betreibt, gebeten, ein Strategiepapier vorzulegen, welches Eckpunkte und Leitlinien zur o.g. Weiterentwicklung beiträgt. Dieses Papier wird hiermit dem Wirtschaftsministerium und der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Nach einer Darstellung der Herausforderungen für die Energieforschung geht das Papier vor allem auf die notwendigen zu beforschenden Technologiepfade in den drei Hauptsträngen der Energienutzung (Strom, Mobilität, Wärme) ein. Es beschäftigt sich auch mit den Forschungsinfrastrukturen sowie der Förderung, die für eine effiziente und nachhaltige Forschung notwendig sind und mit der Einbindung in das internationale Umfeld. Die heutige Komplexität der verschiedenen technologischen Optionen stellt eine große Herausforderung an die Forscher und an die Politik dar.

Politik und Wirtschaft benötigen genügend Handlungsspielraum, um die zukünftig anstehenden Probleme bestmöglich zu bewältigen. Da die wirtschaftlichen, sozioökonomischen, klimatischen, umweltrelevanten und technologischen Randbedingungen in 20, 50 oder gar 100 Jahren kaum vorhersehbar sind, muss die Wissenschaft im Sinne einer Vorsorgeforschung heute und mit langem Atem möglichst viele Technologieoptionen bis zur Einsatzreife vorbereiten. Wir versuchen deshalb, Handlungsansätze anzubieten, wie Deutschland durch Maßnahmen der Energieforschung zielgerichtet und effizient seine wirtschaftliche Leistungskraft erhalten und zugleich den globalen Herausforderungen wie zum Beispiel dem Klimawandel entschieden entgegenzutreten kann.

## 2. HERAUSFORDERUNGEN FÜR EINE NACHHALTIGE ENERGIEVERSORGUNG IM 21. JAHRHUNDERT

Die Anforderungen an eine nachhaltige Energieversorgung – Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Zugangsgerechtigkeit – sind weltweit nicht oder nur unzureichend erfüllt. Folglich gelten für eine nachhaltige Energieversorgung im 21. Jahrhundert folgende

### Leitsätze:

- Eine nachhaltige Energieversorgung ist nicht kurzfristig erreichbar. Über längere Zeit wird ein Energiemix die Versorgung sicherstellen und unter Nutzung innovativer und hocheffizienter Technologien sukzessive optimiert werden müssen.
- Die Energieforschung sollte daher alle technologischen Optionen der Energiebereitstellung weiterentwickeln und mit dem Ziel der Nachhaltigkeit unter Beachtung aller Umwandlungs-, Transport-, Speicher- und Nutzungsprozesse helfen, das Gesamtsystem optimieren.

### 2.1 Zur Situation im globalen Rahmen

In einigen Jahrzehnten werden ca. 10 Milliarden Menschen mit ausreichend Energie zu versorgen sein. Dies in einer nachhaltigen, d.h. sicheren, wirtschaftlichen, gerechten, umwelt- und klimaverträglichen Weise zu gewährleisten, ist ohne Zweifel eine der ganz großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Es wird sich maßgeblich anhand der Energiefrage entscheiden, ob es der Menschheit gelingt, ihre Lebens- und Wirtschaftsweise auf einen nachhaltigen Entwicklungspfad zu bringen.

Nachhaltige Entwicklung umfasst sowohl die aktive Übernahme von Verantwortung aller Nationen für zukünftige Generationen als auch die weltweite Zugangsgerechtigkeit zu Energiedienstleistungen. Die bisherige, stark auf fossilen Energieträgern beruhende Energieversorgung stößt vor allem in zweierlei Hinsicht an Grenzen: in Bezug auf die Endlichkeit der fossilen Energieträger und in Bezug auf die durch deren energetische Nutzung freigesetzten Emissionen und Klimaauswirkungen. Es ist Konsens, dass ein „Weiter so!“ in der Energieversorgung unter dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit keine verantwortbare Option ist.

Der Weltenergieverbrauch steigt und wird noch weiter steigen, verursacht einerseits durch die weiter wachsende Weltbevölkerung, vor allem aber durch das starke Wirtschaftswachstum in bevölkerungsreichen Schwellenländern wie China, Indien und Brasilien. Gegenwärtig werden etwa 75% des Primär-Weltenergiebedarfs durch fossile Energieträger befriedigt. Kernenergie trägt ca. 6% bei, traditionelle Biomasse zu fast 10%, moderne Erneuerbare hingegen nur zu ca. 5%. Diese Situation ist in hohem Maße nicht nachhaltig:

- Etwa ein Drittel der Energie stammt aus Erdöl – demjenigen Energieträger, der am schnellsten erschöpft sein wird, wenn auch der Zeitraum umstritten ist.

- Etwa ein Viertel der Primärenergie stammt aus Kohle, die die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweist, und die vielfach (vor allem in China) unter unsicheren, ineffizienten und nicht umweltverträglichen Bedingungen genutzt wird.
- Die Effizienz in Energiebereitstellung, -umwandlung, -transport und -nutzung ist nach wie vor ungenügend, trotz einiger Erfolge. Vorhandene Potenziale werden in Industrie- und in Schwellenländern bei weitem nicht ausgeschöpft.
- Nach Schätzungen der UN sterben ca. 2 Mio. Kinder jährlich durch Innenraumbelastung mit Schadstoffen, die aus der Nutzung traditioneller Biomasse zum Kochen und Heizen resultiert (vor allem in Südostasien).
- Der Zugang zu Energiedienstleistungen ist global gesehen sehr ungleich verteilt. Verglichen mit den ärmsten Ländern wird in den Industriestaaten pro Kopf rund 25 Mal mehr Energie verbraucht.

Nachhaltige Energieversorgung im 21. Jahrhundert ist eine globale Herausforderung, zu der auf nationaler Ebene entscheidende Beiträge geleistet werden müssen. Diese Beiträge betreffen zum einen die Ausrichtung der nationalen Energieversorgung an den Anforderungen nachhaltiger Entwicklung. Zum anderen wird es eine entscheidende Aufgabe insbesondere der Industrieländer sein, Entwicklungs- und Schwellenländer zu unterstützen. Eine ‚Nachhaltigkeitsinsel Deutschland‘ auf der Basis hoch effizienter aber teurer Technologien hat im globalen Kontext wenig Sinn. Jedoch bieten sich für Deutschland Chancen, durch innovative und angepasste Technologien neue Exportmärkte zu erschließen.

Die langfristigen Ziele einer global nachhaltigen Energieversorgung werden kaum erreicht werden, wenn weltweit das Wirtschaftswachstum nicht vom Wachstum des Energieverbrauchs abgekoppelt wird. Dafür sind technologische Innovationen einschließlich der dafür erforderlichen Grundlagenforschung eine notwendige Bedingung. Es geht erstens um die (erhebliche) Steigerung der Energieeffizienz sowohl auf der Seite der Energieproduzenten als auch der Konsumenten, zweitens um die Substitution von kohlenstoffreichen Energieträgern (Kohle und Öl) durch kohlenstoffärmere als Zwischenschritt und drittens um die verstärkte Erschließung erneuerbarer Energiequellen. Eine CO<sub>2</sub>-arme Strom- und Wärmeerzeugung und ein CO<sub>2</sub>-armer Verkehr sind unter Klimaaspekten zentrale Ziele. Die Realisierung von Effizienzsteigerungen von bis zu 80% und die Erreichung eines Anteils regenerativer, nichtfossiler Energieträger von zunächst 50% sind nur über das Zusammenwirken verschiedener Maßnahmen möglich. Diese schließen Optionen wie die Kernfusion, die Kernenergie mit der Weiterentwicklung in Richtung auf inhärent sichere Reaktoren mit einem geschlossenen Brennstoffkreislauf sowie die CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Lagerung ein.

## 2.2 Nachhaltige Energieversorgung in Deutschland

Deutschland verfügt bis auf seine Vorkommen an Braunkohle nur über vergleichsweise geringe Vorkommen fossiler Energieträger und nur in begrenztem Umfang über Optionen zur wirtschaftlichen Nutzung erneuerbarer Energien. Daher ist Deutschland verstärkt auf den Import von Energie angewiesen. Dies wirft Fragen in Bezug auf die Versorgungssicherheit angesichts möglicher prekärer geopolitischer Situationen auf, z. B. in Bezug auf die Abhängigkeit von Russland oder von arabischen Staaten. Ein hohes Maß an Diversifizierung bei Energieträgern vermindert und verteilt die Abhängigkeiten, genauso wie eine kooperative europäische Vernetzung. Einem koordinierten europäischen Vorgehen in der Energiepolitik und -forschung kommt daher hohe Bedeutung zu.

Klimapolitisch hat sich die Europäische Kommission, dem IPCC folgend, das Ziel gesetzt beizutragen, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf maximal 2 Kelvin gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Um dies zu erreichen, müssen die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zur Mitte des Jahrhunderts von heute fast 30 Mrd. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr auf ca. 10 Mrd. Tonnen pro Jahr reduziert werden. Die EU hat sich dazu verpflichtet, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um mindestens 20%, bei Beteiligung anderer Industrieländer um 30% (bezogen auf das Basisjahr 1990) zu reduzieren. Das Ziel der Bundesregierung ist die Minderung von Treibhausgasemissionen um 30% bis 2020 (gegenüber 1990). Sollte sich die internationale Staatengemeinschaft dem anschließen, wäre Deutschland sogar bereit, das o.g. Ziel zu erhöhen und die Emissionen bis 2020 um 40% gegenüber 1990 zu senken. Dazu soll in Deutschland die Energieproduktivität um 3% pro Jahr gesteigert und der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch bis 2020 auf 18% erhöht werden. Außerdem hat sich die Bundesregierung das Ziel gesetzt, bis 2020 25-30% des Stromverbrauchs aus erneuerbaren Energien bereitzustellen. Im Wärmemarkt soll der Anteil erneuerbarer Energien bis 2020 auf 14% erhöht werden. Der Anteil der Biokraftstoffe soll bis 2020 so weit erhöht werden, dass dadurch die Treibhausgasemissionen um 7% gegenüber dem Einsatz fossiler Kraftstoffe reduziert werden. Der Wechsel von fossilen Kraftstoffen im Verkehrssektor zu alternativen Kraftstoffen oder Strom wird voraussichtlich einen längeren Zeitraum in Anspruch nehmen.

Der Weg hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung wird über längere Zeit einen Energiemix erfordern, in dem die Potenziale aller Einzelenergieträger unter Systemaspekten optimal genutzt werden. Daraus würde sich für die Energieforschung ableiten, sowohl den Potenzialen neuer und innovativer Energieträger nachzugehen, als auch die bestehenden Energieträger und -technologien weiterzuentwickeln. Dabei werden inkrementelle Weiterentwicklungen nicht ausreichen, um die anspruchsvollen Ziele zu erreichen. Vielmehr werden die abgesteckten Ziele ohne Technologiesprünge nicht in dem abgesteckten Zeitrahmen zu erfüllen sein. Hierfür wiederum ist erheblicher Forschungsaufwand bis tief hinein in die Grundlagenforschung zu betreiben.

Für das Erreichen der genannten Ziele sind beispielsweise der Ausbau erneuerbarer Energien im Strombereich, eine drastische Effizienzsteigerung im Wärmebereich (vor allem Gebäude) und der Ausbau der Kraft-Wärme- und Kraft-Kälte-Kopplung besonders wichtig. Mittelfristig kommt auch der Verkehrssektor nicht um einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz herum und das bei gleichzeitiger Abkopplung vom Erdöl. Die Nachrüstung bestehender oder zum Teil erst vor kurzem errichteter Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Minderungstechnologie kann kurz- bis mittelfristig einen sehr großen Effekt haben.

Die in den letzten Jahren aufgebaute energiepolitische Handlungsdynamik muss aufrechterhalten und durch zusätzliche energieforschungspolitische Maßnahmen flankiert werden. Es wird auch darauf ankommen, diesen Prozess noch stärker auf die gesamte EU auszudehnen und abgestimmte Handlungskonzepte über die nationalen Grenzen hinaus zu entwickeln (z.B. europäischer Stromverbund).

Der erhebliche Erneuerungsbedarf im Kraftwerksbestand in Deutschland enthält Risiken, bietet aber auch Chancen für eine Neustrukturierung im Energieversorgungssystem und für die Integration innovativer Technologien. Modernisierungen in diesem Bereich sind allerdings sehr kapitalintensiv. Da energietechnische Anlagen für eine Lebensdauer von 40 und mehr Jahren ausgelegt sind, erwarten Investoren entsprechend

langfristig stabile Rahmenbedingungen und tätigen Investitionen zu entsprechend langfristigen Festlegungen. Verschlechtern sich die Investitionsbedingungen aufgrund politischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Prozesse, so kommt es zu Verzögerungen bei der Modernisierung, und mögliche Fortschritte in der Leistungsfähigkeit des Energiesystems im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung bleiben ungenutzt.

Große Chancen für die deutsche Wirtschaft sind erkennbar, wenn es gelingt, technologische Alternativen zu entwickeln, die in die ganze Welt exportiert werden können. Dazu müssen die Kosten soweit gesenkt werden, dass diese Technologien für den Weltmarkt, insbesondere auch für Schwellenländer, interessant und dort absetzbar sind. Begrenzte und zeitlich befristete Fördermaßnahmen in Deutschland wie das Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG) können eine wichtige Brücke bauen und Technologien zur Einsatzreife und über Lerneffekte zu niedrigeren Kosten führen. Langfristig müssen sich jedoch neue Energietechnologien am Weltmarkt ohne Hilfestellung durchsetzen können.

Die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen zeigt sich letztlich auf der Ebene von Energiesystemen und ihrer gesellschaftlichen Nutzung. Umfassende Systembetrachtungen, die die gesamte Kette von der Bereitstellung primärer Energieträger bis zur Nutzung einschließlich der Handhabung der Abfälle und Emissionen in den Blick nehmen, die die Wirkungen von Einzeltechnologien zusammenführen und die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und Trends (z.B. Gesetze, Verbraucherverhalten, Marktentwicklung) berücksichtigen, sind von entscheidender Bedeutung, um das Gesamtsystem zu optimieren und der Gesellschaft die Umsteuerung hin zu einem nachhaltigen Energiesystem zu ermöglichen („Transition Management“).

# 3. GRUNDSÄTZE FÜR EINE EFFIZIENTE STAATLICHE FÖRDERPOLITIK VON FORSCHUNG UND ENTWICKLUNG IM ENERGIEBEREICH

## Leitsätze:

- Die thematischen Schwerpunkte der Förderung sollten in einem Strategieprozess gemeinsam mit den Akteuren bestimmt werden. Dies führt zur maximalen Effizienz der eingesetzten Ressourcen.
- Die öffentliche Förderung sollte komplementär zu den entsprechenden Industrieanstrengungen erfolgen und sollte über den nationalen Rahmen hinaus der internationalen Dimension verstärkte Bedeutung beimessen.
- Die Energieforschung benötigt langfristige Förderstrategien, die mit Ressourcen ausgestattet werden, welche der Größenordnung des Energie- und Umweltproblems Rechnung tragen.

## 3.1 Schwerpunktbildung der Forschungsförderung

Klimawandel und Ressourcenknappheit stellen Herausforderungen dar, die alle Herausforderungen der letzten 50 Jahre übertreffen. Der notwendige zügige Veränderungsprozess erfordert staatlicherseits eine stärkere Vorsorgeforschung und strategische Führung der Entwicklung, als sie bisher in Deutschland üblich war. Insbesondere in Zeiten wirtschaftlicher Schwierigkeiten kann die Entwicklung nicht in allen Fällen weiter von der Industrie erwartet werden. Die Veränderung muss in gemeinsamer und abgestimmter Forschung von Industrie und Staat bewältigt werden.

Der effiziente Einsatz von öffentlichen Mitteln für die Forschungsförderung erfordert die Definition von Förderschwerpunkten. Innerhalb dieser Schwerpunkte sollten die unterschiedlichen Förderinstrumente konsequent entlang der Wertschöpfungskette von den Grundlagen bis zum Übergang des erworbenen Wissens in die industrielle Anwendung eingesetzt werden. Die Definition der Schwerpunkte sollte im Rahmen eines gemeinsamen Strategieprozesses erfolgen. Durch die intensive Einbindung aller Akteure in diesen Prozess wird gewährleistet, dass die Ressourcen mit maximaler Wirkung eingesetzt werden. Zusätzlich wird durch die Einbindung der wesentlichen Forschungsinstitutionen (Helmholtz, Max Planck, Fraunhofer, Leibniz, Universitäten, Industrie, etc.) das Rollenverständnis der Akteure entlang der Wertschöpfungskette und in Bezug auf die notwendigen Forschungsinfrastrukturen geklärt, und Aufgabenteilung und Zusammenarbeit werden effizient gestaltet.

Die Energiesystemanalyse und die sozioökonomische Forschung müssen durch verstärkte Einbindung und quantitative Orientierung wesentliche Beiträge zum Strategieprozess liefern. Das Ergebnis des Strategieprozesses kann unter dem Aspekt der Langzeitvorsorge nur eine Prioritätensetzung der Energieforschungsaktivitäten sein, die in sich konsistent ist, mögliche Änderungen der Rahmenbedingungen antizipiert und auf Nachhaltigkeit hin orientiert ist. Gleichmaßen sollte sie robust gegenüber kurzfristigen Einflüssen sein, die nicht wissenschaftlich motiviert und begründbar sind.

### 3.2 Komplementarität der Forschungsförderung und Kooperation

Staatlich geförderte Forschung zur Energieversorgung ist als Ergänzung der Forschung und Entwicklung in der Industrie zu verstehen. Eine aus öffentlichen Mitteln finanzierte Forschungsförderung sollte sich vornehmlich auf die Themen und Bereiche konzentrieren, die potenziell wertvolle Beiträge zur Problemlösung leisten können und (noch) nicht hinreichend durch die Industrie abgedeckt werden. Dies führt zu einer Fokussierung der Förderung auf Themen, die von eher langfristiger Natur sind, einem höheren technologischen Erfolgsrisiko unterliegen sowie einen hohen Anteil an Grundlagenaspekten aufweisen. An der Schnittstelle zur industriellen Übernahme sollte gezielte Projektförderung ansetzen, um eine Übertragung des erworbenen Wissens in die Industrie in Bezug auf die angestrebten Innovationen zu erleichtern.

Die Forschungsförderung sollte die internationale Dimension in mehrerlei Hinsicht berücksichtigen. Beispielsweise sollte Deutschland weiterhin die europäische Förderungsstrategie aktiv mitgestalten, damit sich deutsche Einrichtungen erfolgreich vernetzen und europäische Fördermittel akquirieren können. Auch sollte die international erfolgreiche deutsche Energie- und Anlagenindustrie weiterhin mittelbar und unmittelbar durch Forschungsförderung unterstützt werden. So kann sie ihre führende Position auf dem internationalen Markt der Energiewirtschaft und der Energietechnologien halten und diese ausbauen, auch wenn einzelne Energieformen zurzeit in Deutschland nicht weiter eingesetzt werden (z.B. Kernkraft).

Großskalige Forschungsinfrastrukturen sind für eine Reihe von Energieforschungsthemen unverzichtbar, um inhaltliche Fortschritte zu erzielen und Risiken in der Implementierung neuer Techniken zu verringern. Hier nehmen deutsche Forschungseinrichtungen eine tragende Rolle im Forschungs- und Innovationsprozess wahr. Damit der Nutzen anhaltend hoch und das international führende Niveau erhalten bleiben, ist eine gleichbleibend hohe Unterstützung der öffentlichen Hand erforderlich.

### 3.3 Langfristige Förderungsstrategien

Es ist heute politischer Konsens, dass der Energiethematik aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für die Zukunft unseres Landes und der globalen Erfordernisse höchste Priorität eingeräumt werden muss, die nur mit wenigen anderen gesellschaftlichen Themen vergleichbar ist. Die Aufwendungen für Energieforschung in Deutschland steigen zwar seit einigen Jahren an, liegen aber immer noch weit unter dem Niveau Anfang der 1980er Jahre. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse um die Dramatik und die Kosten des Klimawandels wie auch das Problembewusstsein hinsichtlich knapper werdender Ressourcen und zunehmender Energieimportabhängigkeit sind stark gestiegen, bilden sich aber noch nicht in den Budgets ab. Diese gestiegene Bedeutung sollte sich zukünftig in einer angemessenen öffentlichen Forschungsförderung widerspiegeln.

Innovationszyklen auf dem Energie(forschungs)sektor erstrecken sich aufgrund der hohen Investitionsvolumina und der Systemkomplexität über vergleichsweise lange Zeitskalen (z.B. Kraftwerkstechnologien, Fusion, kostengünstiger Solarstrom). Daher ist eine stabile Förderpolitik für die als wichtig identifizierten Forschungsthemen essen-

ziell. Die Förderstrategie sollte eine angemessene Mischung von Grundfinanzierung bzw. institutioneller Förderung und abgestimmter Projektförderung umfassen, damit ein stabiler Bogen von den wissenschaftlichen Grundlagenfragen bis zur Innovation und zur resultierenden Wertschöpfung gespannt werden kann. Entsprechend erfordert die Definition der Schwerpunktthemen aufgrund der hohen und langfristigen Förderaufwendungen einen strategischen Ansatz und die Abstraktion von den kurzfristigen Erfordernissen der Tagespolitik.

Schließlich sollte das Verhältnis der Mittel für Forschungsförderung und der Mittel für die Unterstützung der Markteinführung kritisch und sorgfältig betrachtet werden. Die direkte oder indirekte Subventionierung von Technologien zu ihrer Markteinführung, die derzeit teilweise ein Vielfaches der Forschungsförderung beträgt, sollte in einem wohl überlegten Verhältnis zur Forschungsförderung stehen, damit sich möglichst viele Innovationen entwickeln und durchsetzen können.

## 4. TECHNOLOGIEENTWICKLUNG UND FORSCHUNGSPRIORITÄTEN IM ENERGIEBEREICH

In allen energetischen Anwendungsfeldern (Strom, Mobilität, Wärme/Kälte) sind große Herausforderungen zu bewältigen und besteht entsprechend hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Thematisch fokussierte, langfristig gesicherte und arbeitsteilig operierende Energieforschung ist eine zentrale Voraussetzung, um den Herausforderungen an eine nachhaltige Energieversorgung gerecht werden zu können. Übergreifend gelten folgende

### Leitsätze:

- Die Energieversorgung der Zukunft kann nur durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten effizient, umwelt- und klimaverträglich und gleichzeitig wirtschaftlich wettbewerbsfähig gestaltet werden.
- Grundlagenforschung ist insbesondere in den Bereichen energieeffiziente Prozesse, neue Materialien und Energiespeicherung erforderlich.
- Technologieentwicklung ist entlang der ganzen Kette vom Labor- bis zum Demonstrationsstadium erforderlich, sowohl für Großtechnologien (z.B. Kraftwerke mit CCS/ Carbon Capture & Storage, Kernkraftwerke mit geschlossenem Brennstoffkreislauf als Exporttechnologie) als auch für dezentrale Technologien.
- Mit der zunehmenden Komplexität wächst der Bedarf an Analyse und Optimierung von Energiesystemen auf der regionalen, nationalen und europäischen Ebene, z.B. in Bezug auf Robustheit und Effizienz sowie im Hinblick auf Innovation und Markteinführungsstrategien.
- Zur Umsteuerung auf Systemebene ist Forschung gefordert, z.B. in Bezug auf neue Infrastrukturen oder in Bezug auf größere Änderungen im Gesamtsystem ('transition management').
- Parallel muss Forschung zu ‚Energie und Gesellschaft‘ erfolgen, denn jenseits technischer Fragen sind gesellschaftliche Rahmenbedingungen zu beachten (z.B. zur Akzeptanz von Kernenergie, CCS, Geothermie und Windenergie).
- Insgesamt müssen alle aussichtsreichen Optionen für eine nachhaltige Energieversorgung in Forschung und Ausbildung fundiert abgedeckt werden, um langfristig zukunftsfähig zu bleiben und zukünftigen Generationen Gestaltungsspielraum zu geben.

Darüber hinaus wäre es wünschenswert, in allen Aktivitäten die Abgrenzung zwischen staatlich geförderter Forschung, Markteinführungsprogrammen, Gesetzgebung und Regulierung der Märkte klarer darzustellen. Auch sollte die beinahe unübersehbare Fülle an Einzelprogrammen und -regelungen vereinfacht werden.

Im Folgenden sind die Forschungsbedarfe, aufgliedert in die Bereiche Stromversorgung, Mobilität und Wärme- und Kälteversorgung im Einzelnen dargestellt und kurz erläutert.

## 4.1 Stromversorgung der Zukunft

### Leitsätze:

- Fossile Energieträger werden noch lange Zeit eine bedeutende Rolle bei der Stromerzeugung spielen. Damit dies mit den Klimazielen vereinbar ist, sind die Entwicklung und der Einsatz von Technologien zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung sowie zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung unabdingbar.
- Der wirtschaftliche Einsatz von erneuerbaren Energien als zentralem Pfeiler der Stromerzeugung erfordert große technologische Fortschritte in der Energiewandlung, Verteilung und Speicherung.
- Eine nachhaltige globale Nutzung der Kernspaltung erfordert inhärent sichere neue Kraftwerksgenerationen und die risikoarme Endlagerung der radioaktiven Abfälle.
- Forschung und Entwicklung müssen vorangetrieben werden, um die Kernfusion als nahezu unerschöpfliche Energiequelle technisch und wirtschaftlich so zu beherrschen, dass sie zukünftigen Generationen als Option zur Verfügung gestellt werden kann.

Es ist kaum möglich, den Strombedarf und den Strommix der Zukunft richtig vorherzusagen. Weltweit wird die Nachfrage nach Strom in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich noch deutlich steigen; selbst in den Industrieländern ist immer noch eine stetig steigende Stromnachfrage zu beobachten. Die heute existierenden Szenarien beruhen auf Prognosen über den erwarteten technischen Fortschritt, auf Annahmen zur Preisentwicklung verschiedener Energieträger, auf neuen Einsatzfeldern (z.B. zunehmender Einsatz von Strom in der Mobilität) und auf angenommenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Teilweise implizieren sie auch einen (lediglich postulierten) Wandel im Umgang der Gesellschaft mit elektrischem Strom. Einfluss auf die Entwicklung haben weiterhin die Liberalisierung von Strommärkten, die Förderung bestimmter Technologien (zum Beispiel für Erneuerbare Energien durch das EEG in Deutschland) und mögliche staatliche Vorgaben oder Eingriffe in das Energiesystem. Unstrittig ist, dass der heutige Technologiestand für die Stromversorgung langfristig nicht zukunftsfähig ist.

Forschung und Entwicklung sind in jedem Fall die entscheidenden Werkzeuge, um die zukünftige Stromversorgung sicherzustellen. Dazu sind mit kurz-, mittel- und langfristiger Blickrichtung große Anstrengungen notwendig.

### 4.1.1 Langfristige Perspektiven

Fossile Energieträger werden noch über Jahrzehnte einen entscheidenden Beitrag zur Stromversorgung liefern. Dieser Beitrag muss möglichst effizient und mit minimalem CO<sub>2</sub>-Ausstoß erzeugt werden. Die effiziente Abtrennung und langfristige Speicherung von CO<sub>2</sub> wird zurzeit als Option intensiv diskutiert. Die Abtrennung von CO<sub>2</sub> erscheint zwar machbar, allerdings sind noch wesentliche Fragen zur technischen Ausführung, der Erhöhung der Zuverlässigkeit und insbesondere der Effizienz offen. Gleiches gilt vor allem für die sichere Speicherung von CO<sub>2</sub>. Die Forschung zu CO<sub>2</sub>-Speicherstätten und zur Speichersicherheit sollte deshalb intensiv vorangetrieben werden, um die Risiken dieser Technologie frühzeitig zu identifizieren und geeignete Lösungsstrategien zu entwickeln.

Die großtechnische Bereitstellung von elektrischem Strom aus erneuerbaren Energiequellen birgt ein großes Potenzial, ist technisch möglich, ist aber – insbesondere für die Photovoltaik – heute noch mit hohen Kosten verbunden. Forschung kann hier signifikant zur Verbesserung der heute verfügbaren – teilweise noch wenig ausgereiften Technologien – beitragen und die Grundlagen für langfristig wesentlich effizientere und damit kostengünstigere Technologien bereitstellen. Forschung und Entwicklung müssen dementsprechend entlang der Wertschöpfungskette von den Grundlagen bis zur technologischen Umsetzung betrieben werden.

Kernspaltung ist eine nahezu CO<sub>2</sub>-freie Energiequelle, die in Deutschland mit hohen Sicherheitsstandards und wirtschaftlich betrieben wird. Der zukünftige Einsatz der Kernenergie ist eine Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz und darauf basierender politischer Rahmenbedingungen. International nimmt der Einsatz der Kernenergie zu. Die Entwicklung sicherer, effizienter und innovativer Kernkraftwerkstechnologien mit geschlossenen Brennstoffkreisläufen und die Erforschung und Erschließung sicherer Endlager sind von elementarer Notwendigkeit zur langfristigen Nutzung dieser Energieoption. Sicherheits- und Endlagerforschung sind jedoch auch dann unverzichtbar, wenn Deutschland am Ausstiegsbeschluss festhält.

Kernfusion kann eine CO<sub>2</sub>-freie und nahezu unerschöpfliche Primärenergiequelle werden, die in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einen entscheidenden Beitrag zur Deckung des Welt-Energiebedarfs liefern kann. Forschung und Entwicklung müssen dazu in bedeutendem Umfang heute und morgen geleistet werden, um die erfolgversprechende Entwicklung dieser Option zügig voranzutreiben und um konkrete Meilensteine auf der mittel- und langfristigen Zeitskala demonstrieren zu können.

Übergreifende Zielsetzung ist es, die eingesetzte Primärenergie möglichst effizient in Strom zu wandeln und zu verwerten. Dies betrifft die Erzeugung, die Verteilung, die Speicherung und den Verbrauch von elektrischem Strom sowie die synergetische Nutzung von Wärme und Kälte. Der Anteil an lokal und zeitlich fluktuierend eingespeistem Strom aus erneuerbaren Energieträgern wird zukünftig stark zunehmen. Es besteht daher erheblicher F&E-Bedarf für „intelligente Netze“ und für neue Speichertechnologien, um flexibel auf die schwankende Bereitstellung und Nutzung von Energie reagieren zu können. Die Forschungsthemen umspannen sowohl komplexe Systemfragen als auch die Entwicklung neuer Speichertechnologien, die fundamental neue Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung benötigen.

#### **4.1.2 Wichtige Technologielinien**

Die Stromversorgung der Zukunft muss die Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung des Stroms in komplexen gekoppelten Systemen betrachten. Im Folgenden werden die Technologien zur Stromerzeugung und deren potenzielle kurz-, mittel- und langfristige Entwicklung skizziert sowie entsprechende Forschungsprioritäten abgeleitet. Abschließend werden die Anforderungen an Netze und Speicher diskutiert.

##### **Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern und rationelle Umwandlungstechniken**

In Deutschland erfolgt der Hauptteil der Stromversorgung auf der Basis der fossilen Energieträger Kohle und Gas. Außerhalb Deutschlands, z.B. in China, wird die Nutzung von Kohle sogar massiv zunehmen. Zugleich ist das technische Potenzial der effizienten Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern noch nicht ausgereizt. Daher sind ziel-

gerichtete und kontinuierliche Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Kraftwerkstechnik weiterhin notwendig. Das vorbildliche Förderprogramm COORETEC des BMWi verfolgt seit Jahren die richtige Strategie, welche sich in zwei Teile gliedert: Die erste Strategielinie zielt auf die Erhöhung der Energieeffizienz, wobei der Prozess der Energieumwandlung weiter verbessert werden muss mit dem Ziel, Kohle und Gas so effizient wie möglich zu nutzen und somit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Die zweite Strategielinie beschäftigt sich damit, das entstehende CO<sub>2</sub> hocheffizient abzuscheiden und von der Atmosphäre abgetrennt sicher zu speichern.

Die Erhöhung der Energieeffizienz, also des Wirkungsgrades der gesamten Prozesskette vom primären Energieträger bis zum gewünschten Nutzen beim Endverbraucher, dient sowohl der Minderung der Klima- und Umweltbeeinträchtigungen als auch der Schonung der Ressourcen. Zudem kann durch Kraft-Wärme-Kopplung und individuelle Anpassung an die örtlichen Verbraucher und Energiequellen ein Gesamtnutzungsgrad von über 80% erreicht werden. Vorteile bietet weiterhin der Einsatz von alternativen Energiequellen (Biomasse oder Abfallstoffe aus industriellen und anderen Prozessen). Diese Abfall- und Bioenergien sind ganz oder zumindest teilweise CO<sub>2</sub>-neutral, können jedoch eher in kleineren, speziell ausgelegten Anlagen eingesetzt werden.

Kleinere, dezentrale Anlagen haben einen Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Hinblick auf ihre Brennstoffflexibilität und die Reduzierung der Schadstoffemissionen. Außerdem ist die Systemintegration von Blockheizkraftwerken und den jeweiligen Brennstoffquellen (Holzvergaser, Fermenter usw.) noch zu optimieren.

Bei dezentralen Anlagen können auch Brennstoffzellen einen wichtigen Beitrag zur flexiblen und effizienten Stromversorgung auf verschiedenen Leistungsskalen (Watt bis Megawatt) und auf Basis verschiedener Brennstoffe (Wasserstoff, Methanol, Methan, höhere Alkohole und Kohlenwasserstoffe, Diesel, Kerosin, etc.) liefern. Sie bieten selbst in kleinen Einheiten der dezentralen Energieversorgung Wirkungsgrade, die sonst nur von modernen Großkraftwerken erreicht werden. Insbesondere können Brennstoffzellen auch in KWK (Kraft-Wärme-Kopplung)-Anlagen genutzt werden. Allerdings sind viele Fragen zur Langzeitstabilität, Brennstoffversorgung und Kosteneffizienz noch zu klären.

Für die Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Abtrenn- und Speichertechnologien sind große Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig. Hier sind gleichermaßen die Nachrüstung bestehender Anlagen als auch neue Konzepte mit geringerem Wirkungsgradverlust nur unzureichend untersucht. Verfahren zur Abtrennung sind das Post Combustion Capture Verfahren, das Oxyfuel-Verfahren und das Pre-Combustion Verfahren. Unterstützende Materialentwicklungen hierzu betreffen Adsorption, Kryogen- oder Membrantechnologie. Den weiteren Prozessschritten, dem CO<sub>2</sub>-Transport und der Erforschung und Entwicklung einer nachhaltig sicheren geologischen Speicherung kommt im Gesamtkonzept eine entscheidende Funktion zu.

Zukunftsweisend und bisher kaum untersucht sind Konzepte und Prozesse der alternativen Nutzung und Umwandlung von CO<sub>2</sub> z.B. als Kohlenstoffträger in der chemischen Industrie, der technischen Nutzung von CO<sub>2</sub> als Kühl- und Kältemittel, zur Biomasseproduktion und ähnliches.

## Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energieträgern

Der Anteil Erneuerbarer Energien an der Elektrizitätsversorgung nimmt stark zu. Zu den Erneuerbaren Energien gehören Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik, Solarthermische Kraftwerke, Biomasse, Geothermische Kraftwerke und Meeresenergie. Technisch und wirtschaftlich am weitesten fortgeschritten sind die klassische Nutzung der Wasserkraft und die Nutzung der Windenergie an Land. Die Nutzung von Biomasse zur Stromerzeugung ist grund- und spitzenlastfähig und eignet sich daher als ausgleichender Kombinationspartner für fluktuierende Energieformen (Wind, Sonne) insbesondere auch bei dezentraler Stromerzeugung. Die Umwandlung von Bioenergie in elektrische Energie steht in starker Konkurrenz zu anderen technischen Biomassenutzungen wie der Erzeugung von Kraftstoffen, chemischen Grundstoffen oder der Wärmeerzeugung (siehe Kap. 4.2 und 4.3). Technisch anspruchsvolle Lösungen folgen Nutzungspfaden über Zwischenprodukte wie energiereiche „Bioslurry“. Von großer Bedeutung werden in Zukunft Nachhaltigkeitskriterien für den Anbau von Biomasse sein, etwa die Vermeidung der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, die Begrenzung des Bewässerungsaufwands sowie die Vermeidung der Vernichtung schützenswerter Naturräume. Die Nutzung von Biomassereststoffen hat diesbezüglich große Vorteile. Der zukünftige Forschungsbedarf zur hochwertigen Biomassenutzung ist in Kapitel 4.3 dargestellt.

Die derzeitigen Beiträge der Photovoltaik, der solarthermischen Kraftwerke und der geothermischen Kraftwerke sind ungeachtet ihres technischen Potenzials und trotz hoher Wachstumsraten noch sehr klein. Ursache sind die noch zu hohen Kosten dieser Energie-Technologien; mit den geringsten Kosten und zugleich mit den größten Potenzialen können sie jedoch bereits in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung bzw. günstigen geothermischen Gegebenheiten eingesetzt werden. Damit sich die solare Stromerzeugung langfristig und global etabliert und als zentrale Energiequelle durchsetzt, sind große technologische Fortschritte und dazu auch neue wissenschaftliche Erkenntnisse notwendig. Ziel ist es, höchste Wandlungseffizienzen mit kostengünstigen Systemen zu erreichen. Die tiefe Geothermie kann zur Grundlastversorgung mit Strom beitragen. Eine zentrale Rolle für die zukünftige Nutzung der Geothermie nehmen die „Enhanced Geothermal Systems (EGS)“ ein, die sich zur Erschließung von etwa 95% des geothermischen Potenzials in Deutschland eignen.

Beim Ausbau der Nutzung von fluktuierenden Erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung muss ein besonderes Augenmerk auf die Integration ins Stromnetz gelegt werden. Speicher, Smart Grids und Lastmanagement werden hierbei eine wesentliche Rolle spielen. Wie am Ende dieses Unterkapitels erwähnt, besteht diesbezüglich ein sehr großer Forschungsbedarf.

Eine weltweite Spitzenstellung in Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Stromerzeugung mit Erneuerbaren Energien ist für Deutschland wirtschaftlich hochrelevant, da in diesen Technologiefeldern global große Märkte entstehen. Deutschland ist hier eine der führenden Exportnationen und kann diese Position mittel- und langfristig nur durch Technologieführerschaft erhalten.

***Forschungsprioritäten für die kurzfristige Umsetzung (2020):*** Technologische Entwicklungsarbeiten für Systeme zur Offshore Windenergienutzung; innovative Technologieentwicklung entlang der Wertschöpfungskette von photovoltaischen und solarthermischen Systemen und Kraftwerken; System- und Hybridlösungen für verschiedene erneuerbare Energieträger.

**Mittelfristig (2020+) und langfristige Umsetzung (2040+):** Grundlegende Materialforschung für neue Bauelementkonzepte für die photovoltaische Energiewandlung; Exploration und Technologieentwicklung für EGS an verschiedenen Standorten; Materialforschung und Technologieentwicklung zur Erzeugung solarer Brennstoffe.

### **Stromerzeugung aus Kernenergie**

In Europa wird etwa 30% des Stroms aus Kernenergie gewonnen. Mit erheblichen Beiträgen aus Deutschland hat Europa Kernkraftwerke der 3. Generation entwickelt und beteiligt sich im Generation IV International Forum (GIF) und über EURATOM an der Entwicklung einer innovativen und nachhaltigen Kerntechnik. Der Beitrag der deutschen Forschungseinrichtungen konzentriert sich speziell auf Themen wie Sicherheit, Technologien (u.a. Materialien, Messtechnik), Transmutationspotenzial, Endlagerung und Strahlenschutz. Deutschland muss seine Kompetenzen in der Kerntechnik (Kernreaktoren und Endlagerung) verbessern und erweitern, auch um an ausländischen Entwicklungen zu partizipieren und deren Sicherheitsstandards zu beeinflussen. Nur so können die nukleare Option und das Know-how auf diesem Gebiet erhalten und kontinuierlich verbessert werden. Wesentliche Aspekte für die Entwicklung der Kerntechnik sind:

- Leichtwasserreaktoren der 2. Generation (kurzfristig): Wesentliche Forschungsgebiete sind hierbei Sicherheit, Verfügbarkeit und Brennstoffausnutzung bei der heute weltweit üblichen Laufzeit von 60 Jahren.
- Entwicklung von Leichtwasserreaktoren der 3. Generation (kurz- und mittelfristig): Diese bieten nochmals erhöhte Sicherheit und Zuverlässigkeit, was eine Vorbedingung für die öffentliche Akzeptanz der Kernenergie ist.
- Reaktoren der 4. Generation (mittel- und langfristig): Die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente und die Mehrfachrückführung sind die Grundlagen, auf denen künftige Reaktoren der 4. Generation Nachhaltigkeit erreichen werden. Schnelle Reaktoren mit geschlossenem Brennstoffkreislauf ermöglichen a) eine viel bessere Ausnutzung der natürlichen Ressourcen und b) eine Minimierung von Volumen und Wärmebelastung hoch radioaktiver Abfälle. Die technologischen Grundlagen für den natriumgekühlten Schnellen Reaktor sind derzeit am weitesten entwickelt.
- Nukleare Entsorgung und Endlagerung (kurz-, mittel-, und langfristig): Der Einsatz von Kernreaktoren erfordert den wissenschaftlich fundierten Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Dieser Nachweis basiert auf einem grundlegenden geochemischen Prozessverständnis, das die sichere Prognose für die Entwicklung eines Endlagers auch über sehr lange Zeiträume erlaubt.

**Forschungsprioritäten für die kurzfristige Umsetzung (2020):** Fertigstellung eines europäischen Materialforschungsreaktors sowie eines experimentellen Prototyps für einen Schnellen Reaktor.

**Mittelfristig (2020+):** Industrielle Einführung eines geschlossenen Brennstoffkreislaufs mit experimentellen Transmutationsanlagen.

**Langfristig (2040+):** Realisierung der Endlagerung sämtlicher hochradioaktiver Abfälle in tiefer geologischer Formation.

## Strom aus Kernfusion

Strom aus Kernfusion kann in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts helfen, den Energiebedarf zu decken und ein weiteres Ansteigen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden – sicher, ohne langlebigen radioaktiven Abfall und auf der Basis weltweit langfristig verfügbarer Rohstoffe. Vorliegenden Studien zufolge sind wettbewerbsfähige Stromerzeugungskosten zu erwarten, insbesondere wenn die vorteilhaften Sicherheits- und Umwelteigenschaften berücksichtigt werden. Der Weg zur Fusion führt über den Experimentalreaktor ITER, mit dem Reaktor-relevante Betriebsszenarien und für den Leistungsreaktor wichtige Technologien entwickelt werden sollen. Anlagen vom Typ „Tokamak“ (wie z. B. ITER) arbeiten bisher nur im Puls-Betrieb. Wichtiges Forschungsziel sind daher so genannte „Advanced Tokamak“-Szenarien, die einen Dauerbetrieb ermöglichen könnten. Eine attraktive Alternative bietet der zum Dauerbetrieb fähige Bautyp „Stellarator“. Der Aufbau des Stellarator-Experimentes Wendelstein 7-X in Greifswald ist deshalb ein besonderer Schwerpunkt des deutschen Forschungsprogramms.

Nach Klärung der grundlegenden physikalischen Voraussetzungen hängt die Realisierung eines Demonstrationskraftwerks („DEMO“) im Wesentlichen von den notwendigen technologischen Entwicklungen ab. An erster Stelle ist hier die Entwicklung geeigneter Strukturmaterialien zu nennen, die bei möglichst geringer Aktivierung die notwendige Lebensdauer besitzen, ohne ihre mechanischen Eigenschaften zu verlieren. Gleichzeitig soll die radioaktive Abklingzeit soweit reduziert werden, dass keine Endlagerung benötigt wird, sondern das aktivierte Material wieder verwendet werden kann. Wichtiges Instrument für die Materialentwicklung und -qualifizierung ist die „International Fusion Materials Irradiation Facility“ (IFMIF), die gegenwärtig in einer europäisch-japanischen Kooperation („Broader Approach“) unter starker deutscher Beteiligung vorbereitet wird. Weitere technologische Herausforderungen liegen in der Entwicklung des Brutprozesses zur Gewinnung des für die Fusionsreaktion benötigten Tritiums aus Lithium, des Brennstoffkreislaufs mit Tritium-Extraktion sowie von Hochtemperatur-Kühlungstechnologien. In all diesen Bereichen werden Konzepte in ITER getestet werden, die dann entsprechend den gewonnenen Erkenntnissen angepasst und auf DEMO-Bedingungen skaliert werden müssen. Auch in den Bereichen Plasmaheizung und plasmaberührende Materialien wird man auf Erkenntnisse bei ITER aufbauen können, aber die Entwicklung im Hinblick auf die weitaus höheren Anforderungen in DEMO fortführen müssen.

Insgesamt besteht die Aufgabe darin, die technologischen Entwicklungen Hand in Hand mit der Konsolidierung bzw. Erweiterung des Operationsbereichs von Fusionsplasmen für die Entwicklung eines effizient arbeitenden Fusionskraftwerks voranzubringen. Bei allen erwähnten Forschungsaspekten und technologischen Herausforderungen spielen deutsche Forschungszentren und Forschungsinstitute eine zentrale, manchmal sogar weltweit führende Rolle. Der Erfolg der internationalen Fusionsforschung und geplanten Großgeräte wird also entscheidend von der entsprechenden Förderung der deutschen Aktivitäten abhängen.

***Forschungsprioritäten für die kurzfristige Umsetzung (2020):*** Fertigstellung von ITER und Wendelstein 7-X; Errichtung von IFMIF.

***Mittelfristig (2020+):*** Szenarien für Kraftwerksbetrieb; Konzeptionelles Design für Demonstrationsreaktor DEMO; Materialqualifizierung, u.a. mit IFMIF; Beginn der Realisierung von DEMO.

***Langfristig (2040+):*** Fertigstellung DEMO, Nachweis des wirtschaftlichen Reaktorbetriebs.

### Netze, Speicher und Systemtechnologien:

Elektrischer Strom ist als Energieform äußerst hochwertig. Strom lässt sich über relativ weite Strecken transportieren, verteilen und für vielfältigste Anwendungen vom industriellen Großeinsatz bis zu kleinsten Anwendungen im Haushalt effizient einsetzen. Der Anteil an lokal und zeitlich fluktuierend eingespeistem Strom aus erneuerbaren Energieträgern nimmt bereits heute stark zu, und die Fluktuationen werden durch neue Anwendungen (z. B. Elektromobilität) weiter steigen. Intelligente Netze, niedrige Transportverluste und neue Speichertechnologien, die flexibel auf neue Technologien und die schwankende Bereitstellung und Nutzung von Energie reagieren können, werden zu einer sehr wichtigen Herausforderung.

Forschungsbedarf bezüglich der Netze besteht insbesondere auf vier Gebieten. Erstens erfordert der Stromtransport aus Regionen bevorzugter Sonneneinstrahlung (Nutzung von Photovoltaik und konzentrierender Solarthermie im Sonnengürtel Europas) oder vergleichsweise großen Windanfalls (z.B. in nördlichen Küstenregionen) ein überlageretes (europäisches) Hochspannungsnetz, z.B. 800 kV Drehstrom oder 600 kV Gleichstrom, zur möglichst verlustarmen Überbrückung großer Distanzen vom Erzeugungszum Nutzungsort. Die Entwicklung und Verknüpfung dieses European Super Grid mit den bestehenden 400 kV Verbundnetzstrukturen benötigt ein hohes Maß an begleitender Forschung. Zweitens wird eine ganzheitliche und hochdynamische Modellierung und Überwachung des Übertragungssystems unter Einbeziehung aller Erzeuger, der Lastentwicklung und auch des adäquaten Speichereinsatzes nötig sein. Hierzu sind die entsprechenden Modellierungs- und Überwachungswerkzeuge zu entwickeln, die sowohl bezüglich Umfang als auch bezüglich Dynamik den zukünftigen Anforderungen gerecht werden. Und drittens wird der Einsatz schneller Netzinformationssysteme zur Zustandsbeobachtung benötigt, um aus einer Zustandsanalyse eine Online Stabilitätsanalyse bzw. Netzsicherheitsanalyse ableiten und schnell reagieren zu können.

Zudem sind neue Speicherkonzepte von herausragender Bedeutung. Große mechanische Speicher wie Pumpspeicher können große Energiemengen effizient speichern, jedoch gibt es in Deutschland nur wenige Standorte. Ergänzende Möglichkeiten bieten hier großvolumige Druckluftspeicher (z.B. Kavernen in Salzstöcken), vor allem wenn sie adiabatisch, d.h. mit Wärmespeicher betrieben werden, oder chemische Speicher. Beide Arten von Speicherung sind nicht hinreichend entwickelt, vor allem nicht hinsichtlich der zunehmenden großen Mengen an fluktuierendem Strom, und sie sind noch weit von akzeptablen Effizienzwerten entfernt. Die chemische Speicherung in leistungsstarken Batterien oder die Erzeugung von chemischen Energieträgern (z.B. Wasserstoff durch Elektrolyse oder thermochemische Kreisprozesse) ist mit der heute zur Verfügung stehenden Technologie nur für relativ kleine Anwendungen und mit hohen Kosten und geringer Effizienz möglich. Sie bieten jedoch grundsätzlich ein hohes Potenzial mit großen Chancen, wenn beispielsweise neue Elektromobilitätskonzepte verwirklicht werden sollten, bei denen die zahlreichen dezentralen Speicher, z.B. in Pkws, Teil eines integrierten Gesamtkonzepts sind. Der Bedarf an grundlegender Forschung und technologischer Entwicklung für wettbewerbsfähige Speichertechnologien ist insgesamt außerordentlich hoch.

*Forschungsprioritäten für die kurzfristige Umsetzung (2020):* Die Entwicklung von Systemtechnologien (Hybridtechnologien, Netzeinspeisung, Speicher) zur optimalen Nutzung von – insbesondere erneuerbarer - Energie in Bezug auf Strom-, Wärme, Kälteerzeugung und Energiespeicher sowie zur Nutzung der Stromverbundnetze als Speicher.

*Mittelfristig (2020+) und langfristige Umsetzung (2040+):* Leistungsstarke neue Batterietechniken als Netzspeicher und für die Elektromobilität als Teil eines integrierten Gesamtsystems. Entwicklung von supraleitenden oder Höchstspannungsnetzen für verlustarmen Stromtransport über große Strecken. Grundlegende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Bereitstellung chemischer Energieträger aus erneuerbaren Energien, auch um die Stromfluktuationen auszugleichen.

#### 4.1.3 Resümee

Mit unserem heutigen Wissen in Unkenntnis künftiger globaler politischer und sozio-ökonomischer Rahmenbedingungen können wir nur schwer abschätzen, wie das Stromversorgungssystem und der „Strommix“ in der Zukunft aussehen werden. Szenarien, die das Prädikat „nachhaltig“ rechtfertigen, sind für vielfältige Kombinationen verschiedener Energiesysteme mit unterschiedlicher Gewichtung der einzelnen Komponenten denkbar. Alle beruhen auf der Annahme eines großen technischen Fortschritts, der nur durch umfassende Forschung erreicht werden kann. Dementsprechend sollten wir alle wichtigen Optionen für eine nachhaltige Stromerzeugung in Forschung und Ausbildung fundiert abdecken, um den besten Weg zu finden und langfristig zukunftsfähig zu bleiben.

## 4.2 Mobilität der Zukunft

Der Verkehr trägt heute wesentlich zu den klimawirksamen Emissionen bei und hängt zugleich sehr stark vom Energieträger Erdöl ab. Demnach kann die „Entkarbonisierung“ des Verkehrs wesentlich zur Erreichung der klima- und energiepolitischen Ziele beitragen und die Risiken der Abhängigkeit vom Erdöl reduzieren. Folglich gelten zur Ausrichtung der Energieforschung folgende

#### Leitsätze:

- Elektromobilität (inklusive Hybridantriebe) hat das Potenzial, bei Verwendung nachhaltig erzeugten Stroms oder chemischer Energieträger langfristig eine Wende hin zu nachhaltiger Mobilität zu erreichen.
- Die heute eingesetzten Techniken weisen noch deutliche Optimierungspotenziale auf, die parallel gehoben werden müssen (Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe, Leichtbau, Aerodynamik).
- CO<sub>2</sub>-neutrale, nicht-fossile Kraftstoffe sind für alle Verkehrssysteme anzustreben, langfristig sind sie vor allem für den Flugverkehr relevant, bei dem eine Elektrifizierung nicht realistisch erscheint.

Zugleich gilt es, die lokalen Emissionen (Abgase, Lärm) zu senken und das Verkehrssystem als Ganzes zu optimieren. Diese Ziele sollten im Rahmen der Energieforschung mit verfolgt werden.

Vorrangig muss der Individualverkehr „entkarbonisiert“ werden. Dies ist über Elektromobilität mittels Batterien oder mittels Brennstoffzellen und Wasserstoff möglich, wenn der Strom bzw. der Wasserstoff aus CO<sub>2</sub>-neutralen Quellen stammen. Für Busse und den Lastnahverkehr gilt dies ebenso.

Forschung vor allem durch die Automobilindustrie sollte zu einer Senkung des Kraftstoffverbrauchs konventioneller Antriebe beitragen. Speziell Antriebe großer Leistung werden aus heutiger Sicht auch langfristig auf Erdöl (Mitteldestillate) beziehungsweise entsprechenden Bio- oder alternativen Kraftstoffen beruhen. Hier kommt der Entwicklung hocheffizienter Motoren und Abgasreinigung mit Abscheidung eine hohe Bedeutung zu. Die Forschung für eigenständige Bordstromversorgungen spielt dabei eine zunehmende Rolle, da auch der Bordstrombedarf stetig ansteigt und da durch eine Entkopplung von Antrieb und Stromerzeugung die Systemeffizienz erheblich gesteigert werden kann. Dies gilt für straßengebundene Mobilität wie auch für Flugzeuge, Schiffe und Bahn. Von Bedeutung sind Systeme, die bei Schwerlastdieselmotoren nachgerüstet werden können, die bereits im Bestand der Binnen- und Seeschiffe oder der Schienenfahrzeuge sind und eine sehr lange Nutzungsdauer aufweisen. Bordstromversorgungen wirken sich besonders positiv auf die lokalen Emissionen aus.

Ein veränderter Kraftstoffmix für Kraftfahrzeuge unter starker Einbeziehung regional verfügbarer, erneuerbarer bzw. treibhausgasarmer Primärenergieträger wird langfristig und in Verbindung mit weiterentwickelten konventionellen und neuartigen Antriebssystemen einen wichtigen Beitrag leisten können, vor allem durch die Entwicklung von Biokraftstoffen der zweiten Generation.

Im Folgenden werden die genannten technischen Entwicklungslinien näher erläutert.

#### **4.2.1 Elektrifizierung und Hybride**

Die Elektrifizierung von Fahrzeugen ermöglicht perspektivisch die weitgehende Vermeidung von klimawirksamen Emissionen und reduziert die Abhängigkeit vom Öl. Brennstoffzellen im Betrieb mit Wasserstoff ermöglichen deutliche Effizienzsteigerungen von PKW-Antrieben bei Beibehaltung hoher Reichweiten, sind jedoch noch nicht einsatzreif. Neue und weiterentwickelte Batterietechnologien erlauben mit reinen Batteriefahrzeugen hocheffiziente Mobilität, wenn auch derzeit noch mit geringen Reichweiten. Beide Ansätze stellen nur dann einen Fortschritt dar, wenn die Energieversorgung (Wasserstoff bzw. Strom) jeweils nachhaltig erfolgt. Sie sind insbesondere dann sehr attraktiv, wenn die Einbindung in das stationäre Energieversorgungssystem möglichst optimal gelingt. Diesem systemischen Aspekt sollte deshalb hohe Aufmerksamkeit und nachdrückliche Forschungstätigkeit gewidmet werden.

Auch die Antriebseffizienzen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren lassen sich mittels Hybridisierung und Bremsenergierückgewinnung moderat verbessern. Antriebsunabhängige Stromerzeuger in Bordnetzen von Schiffen, LKW, Schienenfahrzeugen und Flugzeugen realisieren auf der Basis von Brennstoffzellen und in Verbindung mit hocheffizienten Batterien eine weitere Reduzierung von Kraftstoffbedarf und lokalen Emissionen. Solche Systeme erfordern üblicherweise einen vorgeschalteten Reformer zur Umsetzung flüssiger Kraftstoffe wie Kerosin oder Diesel in ein geeignetes Brenngas. Auch hierzu sind Forschungsarbeiten zur Optimierung der Gesamteffizienz und der Wirtschaftlichkeit vonnöten.

Zur Batterieversorgung sind aus heutiger Sicht Lithium-Ionen-Akkumulatoren aufgrund hoher Leistungs- und Energiedichte am besten geeignet. Zugleich müssen andere innovative Systeme und Materialien identifiziert, auf ihre Eignung untersucht und

für den Einsatz optimiert werden. Für einen serientauglichen Einsatz in batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen oder als Komponente hybrider Antriebe sind vor allem folgende grundlegende Forschungsthemen zu bearbeiten:

- Identifikation geeigneter Elektrolyte und Materialpaarungen der Elektroden,
- Erhöhung der Speicherkapazitäten um einen Faktor 4 (Wunschziel Faktor 10),
- Erhöhung der kalendarischen und Zyklenlebensdauer,
- Aufklärung von Degradationsmechanismen und Maßnahmen zu ihrer signifikanten Reduktion,
- Entwicklungen zur Kostensenkung mindestens um einen Faktor 3.

Pkw-Antriebe mit Brennstoffzellen im direkten Wasserstoffbetrieb erzielen einen deutlich höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotorantriebe. Diese Aussage gilt auch für Hybridantriebe mit Verbrennungsmotoren. Auch Brennstoffzellensysteme lassen sich durch Hybridisierung weiter optimieren. Im Vergleich zu reinen batterieelektrischen Fahrzeugen lassen sich deutlich höhere Reichweiten ähnlich denen heutiger Pkw erreichen, jedoch sind die Fragen nach kostengünstiger und flächendeckender Brennstoffversorgung und nach sicherer Speicherung durch Forschungsanstrengungen zu beantworten. Auch hier sollten die Gesamteffizienz und die sozioökonomischen Gesichtspunkte in einem systemischen Forschungsansatz ermittelt werden.

Pkw und Busse mit Brennstoffzellen haben das Potenzial zur Kommerzialisierung; eine breite Markteinführung ist jedoch nicht vor 2020 zu erwarten. Außerdem ist der Wettbewerb zwischen Brennstoffzellen, Batteriesystemen und hybriden Systemen verschiedener Art noch längst nicht entschieden. Zur Erreichung des Entwicklungsstands heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind neben den für die Fahrzeugindustrie typischen F&E-Aktivitäten weiterhin grundlegende Forschungsanstrengungen notwendig.

Die Entwicklung der verschiedenen Brennstoffzellentypen fokussiert insgesamt auf die Senkung der Kosten sowie die Verbesserung der Lebensdauer und anderer Leistungsdaten. Konkret bedeutet dies:

- Materialforschung für neue ionenleitende Membranen inklusiver zugehöriger Herstell-, Prüf-, und Charakterisierungsverfahren,
- neue elektrochemische Katalysatoren,
- die Erforschung und Reduzierung von Degradationsmechanismen,
- Zellen- und Stack-Konzepte, einschließlich der Montage- und Recycling-Verfahren,
- Modellierung und Simulation zur weiteren Erforschung der chemisch-physikalischen Grundlagen und zur Optimierung von Zellen, Stacks und Systemen.

Batterien und Brennstoffzellen sind im fünften Energieforschungsprogramm bereits im Bereich „Speichertechnologien und Wasserstoff“ berücksichtigt. Es wird empfohlen, Elektromobilität als Schwerpunkt der Mobilitätsforschung deutlich stärker herauszuheben und Batterie-, Brennstoffzellen-, und Hybridtechnologien in Abstimmung mit den jeweiligen Industrieaktivitäten entsprechend zu fördern. Dies schließt Technologien zur Versorgung von Bordnetzen ein. F&E-Themen im Bereich der Antriebsentwicklung einschließlich der Betriebsstrategien hybrider Antriebe von Straßen- und Schienenfahrzeugen lassen sich der Industrie- und Industrie-nahen Forschung zuordnen, während Material- und Konzeptentwicklungen bis hin zu Demonstratoren die institutionelle Forschung betreffen.

#### 4.2.2 Optimierung vorhandener Technologien

Die Reduzierung der Fahrwiderstände und Fahrzeugmassen verringert den Kraftstoffverbrauch von Transportsystemen erheblich. Verbrennungstechnische Optimierung im Einklang mit geeigneten Abgasnachbehandlungsverfahren führen bei vorhandenen Aggregattechnologien mit bereits hohem Entwicklungsstand, wie Hubkolbenmotoren und Gasturbinen, zu weiter reduziertem Kraftstoffverbrauch und deutlich verringerten lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen. Für die kurz- und mittelfristige Reaktion auf die Herausforderungen ist die Optimierung vorhandener Techniken durch weitere Forschung notwendig.

Maßnahmen, die eine Verringerung des Kraftstoffbedarfs von Straßen- Luft-, Wasser- und Schienenfahrzeugen bewirken, sind:

- Leichtbau durch Einsatz neuer Materialien, auch auf Biomassebasis,
- Optimierung der Verbrennungsprozesse in Otto- und Dieselmotoren,
- Anpassung und Optimierung der Verbrennung an Kraftstoffe auf Biomassebasis als Reinkraftstoff oder als Mischungskomponente in konventionellen Kraftstoffen,
- Optimierung des mechanischen Antriebsstrangs, auch bezüglich der grundsätzlichen Auslegung einschließlich der Wahl der Betriebspunkte der Antriebsmaschine.

Die Optimierung der Verbrennungsverfahren muss stets im Zusammenhang mit der Abgasnachbehandlung erfolgen, da die Rohgasemissionen den Aufwand der Abgasreinigung mitbestimmen.

Über die Inhalte des fünften Energieforschungsprogramms hinaus wird empfohlen, vorhandene, in der Mobilität eingesetzte Technologien zu fördern, die trotz jahrzehntelanger Weiterentwicklung ein erhebliches weiteres Potenzial zur Verringerung von Kraftstoffverbrauch und Treibhausgasemissionen sowie lokal wirksamer Schadstoffemissionen aufweisen. Die Bearbeitung zugehöriger Forschungs- und Entwicklungsthemen liegt weitgehend in der Kompetenz der Industrie und kann durch legislative Maßnahmen stark befördert werden. Damit im Zusammenhang stehende Themen, die die Erforschung neuer Materialien oder physikalischer Grundlagen beispielsweise von Verbrennungsvorgängen betreffen, sollten in starkem Maße die institutionelle Forschung einbeziehen.

#### 4.2.3 Alternative Kraftstoffe

Der Einsatz von nachhaltig erzeugten alternativen Kraftstoffen (z.B. Wasserstoff oder Biokraftstoffe, aber auch andere, wie Methan, Methanol, Ethanol und synthetische hochwertige Kohlenwasserstoffe) erlaubt

- langfristig eine deutliche Reduktion der Abhängigkeit des Verkehrssektors von fossilen Einsatzstoffen, besonders vom Erdöl,
- bereits mittelfristig eine moderate Verringerung von Primärenergieeinsatz und Klimagasemissionen bei der Pkw-Nutzung.

Chemische Energieträger weisen eine deutlich höhere Energiedichte auf als Batterien. Hiermit sind sie die erste Wahl, wenn aus technischen Gründen hohe Anforderungen an ein geringes Gewicht gestellt werden, wie insbesondere beim Flugverkehr. Bedin-

gung für alle künftigen Kraftstoffoptionen sollte sein, dass deren Herstellung und Einsatz weitgehend CO<sub>2</sub>-neutral sind. Wasserstoff ist also durch Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Quellen oder z.B. durch solarthermische Verfahren zu erzeugen, und Biokraftstoffe sollten nur dann einen Beitrag leisten, wenn sie nachhaltig, also z.B. nicht auf Kosten schützenswerter Naturräume erzeugt wurden (sondern etwa aus Abfallbiomassen).

Neue Kraftstoffe sind in der mittel- bis langfristigen Perspektive zu sehen und für beide vorgenannten Ziele, sowohl im konventionellen Bereich als auch in der Elektrifizierung, für wesentliche weitere Fortschritte unverzichtbar. Falls sie in entsprechenden Mengen gewonnen werden können, können alternative Kraftstoffe langfristig zu einer weitgehenden Unabhängigkeit des motorisierten Individualverkehrs von Erdöl führen.

Bereits kurzfristig ist eine moderate Verringerung von Primärenergieeinsatz und Klimagasemissionen der Pkw-Nutzung möglich, wenn Erdgas als Primärenergie eingesetzt wird. Hier müssen neben geeigneten verfahrenstechnischen Schaltungen insbesondere Materialien und Verfahren zur Gastrennung entwickelt werden.

Flüssige Kraftstoffe, zunehmend auf Biomassebasis, werden wegen ihrer hohen Energiedichte auch langfristig im Güterstraßenverkehr, in der Luftfahrt und in der Schifffahrt eine zentrale Bedeutung haben. Die Entwicklung synthetischer kohlenwasserstoffbasierter Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sowie die Syntheserouten chemischer Energieträger auf Basis alternativer Einsatzstoffe (z.B. Mikroalgen, gentechnisch optimierte Pflanzen, biogene Rest- und Abfallstoffe) sollten Schwerpunkte der zukünftigen Forschung sein. Weiterhin sind die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe für motorische Verbrennung und gegebenenfalls Reformierung in Systemen mit Brennstoffzellen sowie notwendige Anpassungen von Materialien und Betriebsparametern Gegenstand der Forschung und Entwicklung.

Bei der Biomasseproduktion bedürfen Anbau- und Ernteverfahren sowie Modifikation der verwendeten Pflanzen mit Rücksicht auf Vergasungs- und Verbrennungseigenschaften weiterer Forschung und Entwicklung. Verfahren zur Umwandlung von halmgut- und holzartiger Biomasse in synthetische Kraftstoffe sind aktuell in der Demonstration, müssen aber bezüglich Biomassevorbehandlung, Verfahrensauswahl, Heißgasreinigung und Zuverlässigkeit weiter entwickelt und optimiert werden. Darüber hinaus sollten auch Verfahren zur Umwandlung von Zellulose in Ethanol, das als Blendkomponente für Ottokraftstoffe eingesetzt wird, weiter erforscht und entwickelt werden.

Speziell die Herstellung und Speicherung von Wasserstoff bedürfen weiterer grundlegender Forschungsarbeiten, während Distributionstechnologien weitgehend verfügbar sind. Zu erforschen ist die Wasserstoffherstellung

- mittels weiter entwickelter Elektrolyseverfahren, insbesondere zur Steigerung der Effizienz,
- aus Biomasse über den Weg der Vergasung,
- solar über thermochemische Kreisprozesse,
- aus Kohle mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung,
- auf biologischem Wege,

sowie die Wasserstoffspeicherung in chemischen oder Metallhydriden.

Die elektrolytische Wasserstoffherstellung bietet eine Nutzungsoption zur Kompensation der Stromfluktuationen aus Windkraft und Photovoltaik. Hierbei spielen einerseits Effizienzbetrachtungen und das Erreichen von Kostenzielen eine herausgehobene Rolle. Andererseits sollten die Potenziale der Wasserstoffproduktion mit Rücksicht auf die Grenzen der Aufnahmefähigkeit des Stromnetzes erforscht werden. Neben der Elektrolyse kann Wasserstoff langfristig auch in großtechnischem Maßstab mittels Solarenergie über thermochemische Kreisprozesse CO<sub>2</sub>-frei bereitgestellt werden. Bei Verfügbarkeit von Verfahren zur Kohlendioxidabtrennung und -speicherung und ausreichenden Speicherkapazitäten könnte auch Kohle zur großtechnischen Wasserstofferzeugung eingesetzt werden.

Da Wasserstoff bisher fast ausschließlich industriell gehandhabt wurde, erfordert die Einführung als Kraftstoff die Weiterentwicklung der Sicherheitsstandards. Der Sicherheitsforschung kommt damit eine besondere Rolle zu, insbesondere wenn Wasserstoff in Verbindung mit Brennstoffzellen im elektromobilen Individualverkehr eingesetzt werden soll.

Über die Inhalte des fünften Energieforschungsprogramms hinaus wird empfohlen, das Spektrum der F&E-Maßnahmen zu Wasserstoffherstellung und -speicherung entsprechend zu erweitern. Gleiches gilt für andere alternative Kraftstoffe und Biokraftstoffe der 2. Generation, die im fünften Energieforschungsprogramm nur als synthetische BTL-Treibstoffe berücksichtigt wurden. Die hier aufgeführten Themen richten sich aufgrund ihrer Komplexität und des notwendigen technischen Aufwands bei der Errichtung von Demonstrationsanlagen zur Kraftstoffherstellung vornehmlich an die institutionelle Forschung.

#### **4.2.4 Informations- und Kommunikationstechnologien**

Der verstärkte Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien kann in vielen Bereichen zu Verbesserungen in mobilen Systemen beitragen. Kontroll- und Regelsysteme in zunehmend komplexen Antriebsstrangkonfigurationen unterstützen die Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsreduktion. Fahrerassistenzsysteme tragen zur Sicherheit im Straßenverkehr bei. Verkehrsleitsysteme zur Verbesserung von Verkehrsfluss und Streckenführung stützen sich auf die zeitnahe Erfassung und Übertragung relevanter Informationen und können signifikant zur Energieeinsparung und Reduktion von Schadstoffemissionen beitragen.

Es wird empfohlen, F&E zu Informations- und Kommunikationstechnologien zu verstärken. Entsprechende F&E-Themen können industriegeführt bearbeitet werden.

#### **4.2.5 Systemanalytische Begleitforschung**

Technischer Fortschritt und neue Technologien erweitern den Handlungsspielraum erheblich und können zu deutlichen Veränderungen in der Energiewirtschaft führen. Systemanalytische Themen sollten daher, in Ergänzung des fünften Energieforschungsprogramms, fester Bestandteil der Energieforschung sein und mittels der Bewertung von technischen und wirtschaftlichen Optionen deren strategische Ausrichtung durch konkrete Handlungsempfehlungen unterstützen. Dies betrifft in der technischen Dimension des Bereichs Mobilität die integrierte Betrachtungsweise von Kraftstoff und Antriebstechnologie bezüglich der Kriterien Energiebedarf, Umweltwirkungen und Wirtschaftlichkeit, aber auch die Aspekte des Individualverhaltens und der Akzeptanz.

### 4.3 Wärme- und Kälteversorgung der Zukunft

60% des deutschen Endenergieverbrauchs werden zur Wärmeerzeugung für die Sektoren Industrie (22%), Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (11%) und Haushalte (27%) benötigt. Daher basieren alle Szenarien für eine nachhaltige Energieversorgung auf wesentlichen Beiträgen des Wärme- und Kältesektors.

Die angestrebten nationalen Ziele zum Klimaschutz und zur Einsparung fossiler Energieträger lassen sich auch im Wärmebereich nur durch ein Bündel von Maßnahmen erreichen.

#### Leitsätze:

- Das größte Einsparpotenzial beim Verbrauch fossiler Brennstoffe und den damit verbundenen Emissionen besteht in einer Verminderung des Wärmebedarfs von Gebäuden.
- Die Effizienzerhöhung thermischer Prozesse, die Nutzung von Wärmequellen auf verschiedensten Temperaturniveaus und der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) müssen verstärkt vorangetrieben werden.
- Die notwendigen Einsparungs- und CO<sub>2</sub>-Minderungsziele im Wärmesektor können durch effizientere Energiewandlung und -nutzung alleine nicht erreicht werden. Parallel hierzu muss ein beschleunigter Ausbau der Nutzung von erneuerbaren Energiequellen (Solarthermie, Geothermie, Biomasse) erfolgen.
- Effiziente und wirtschaftliche thermische Speicher sind eine Schlüsseltechnologie für eine nachhaltige Wärme- und Kältebereitstellung.
- Eine strukturelle Barriere sind die derzeit in Deutschland noch unzureichend ausgebauten Fern- und Nahwärmenetze, die für einen hohen Anteil an KWK und Wärme aus erneuerbaren Energiequellen benötigt werden.

Zu allen genannten Aspekten sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig. Dies beinhaltet sowohl die Entwicklung von neuen Technologien wie auch die Verbesserung existierender Technologien, Materialien und Prozesse. Die folgenden Abschnitte enthalten eine Übersicht über diese Arbeiten, die von ausführlichen systemanalytischen Untersuchungen begleitet und unterstützt werden müssen. Eine abschließende Realisierung der Entwicklungen in einem sinnvollen technischen Maßstab ist notwendig, um die Funktionalität zu demonstrieren und den Technologietransfer zu ermöglichen.

#### 4.3.1 Steigerung der Nutzungseffizienz

##### Gebäudesektor

Etwa ein Drittel des deutschen Endenergiebedarfs wird für die Heizung und Klimatisierung von Gebäuden benötigt; dies kann durch bessere Dämmung, effizientere Heiztechnik, Wärmerückgewinnung und die verstärkte Nutzung von Nah- und Fernwärme um 60-80% verringert werden. Da in Deutschland jährlich nur etwa 1% des Gebäudebestands erneuert wird, ist die Möglichkeit der Integration von Maßnahmen zur Energieeinsparung in vorhandene Gebäude besonders wichtig.

Wesentliche Aspekte sind innovative Gebäudekonzepte zur besseren Integration von Technologien für die Nutzung der Solarenergie, Wärmespeicherung, hocheffiziente Dämmung und Lichtnutzung. Ein Beispiel hierfür sind neuartige multifunktionale Fassadenkollektoren. Neue temperatur- und wetterbeständige Materialien für die Gebäudehülle, möglichst in Verbindung mit Leichtbaukonzepten, sollten entwickelt und demonstriert werden. Eine weitere Voraussetzung ist die Entwicklung von fortschrittlichen, selbstoptimierenden Regelungssystemen für das gesamte Gebäude-Energiemanagement basierend auf Fuzzy Logic, Neuronalen Netzwerken und Expertensystemen.

### **Energieeffiziente Prozesse**

Industrielle Prozesswärme im Temperaturbereich 100-1000°C macht etwa 20% des deutschen Endenergiebedarfs aus. Dieser erhebliche Bedarf muss zum einen über effizienteres Wärmemanagement, d.h. eine möglichst exergieeffiziente Kaskadierung der Wärmeübertragungsprozesse, sowie durch die Verminderung des Wärmebedarfs der einzelnen Produkte durch Entwicklung neuer Prozesse erfolgen. Die Nutzung von Abwärme in Wärme-Kraftprozessen und mit wärmegetriebenen Sorptionskälteanlagen sind weitere Entwicklungspfade, die verfolgt werden sollten.

Das Spektrum der industriellen Prozesse ist zu divers, um es auf wenige Lösungsansätze und Technologielinien zur Verminderung des Energieverbrauchs zu reduzieren. Schwerpunkte zukünftiger F&E-Arbeiten sollten deshalb Prozesse sein, die einen besonders hohen Ressourcen- und Energiebedarf haben:

- Entwicklung von neuen Materialien und Produkten, die besonders Energie-intensive Produktionen ersetzen;
- Intensivierung von verfahrenstechnischen Prozessen durch neue Katalysatoren, Mikro-Prozesstechnologie und innovative Verfahren wie z.B. die Mikrowellentechnologie;
- Einsatz von innovativen Lösungen für den effektiven Transfer von großen Wärmemengen mit geringen Exergieverlusten;
- Entwicklung von auf Halbleitertechnologie basierenden thermoelektrischen Generatoren für die direkte, einfache und zuverlässige Umwandlung von ansonsten nicht nutzbarer Abwärme in Strom.

### **Wärmespeicher**

Wärmespeicher sind eine Querschnittstechnologie, die immer dann von Bedeutung ist, wenn die Verfügbarkeit und der Bedarf an Wärme zeitlich nicht übereinstimmen. Die Entwicklung von leistungsfähigen Wärmespeichern vom kWh- bis zum GWh-Maßstab ist von herausragender Bedeutung, da eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, intensive Abwärmenutzung und ein konsequenter Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung ohne die Verfügbarkeit von technisch und wirtschaftlich attraktiven Wärmespeichern nicht realisierbar sein wird. Bisherige Hemmnisse für einen breiten Einsatz thermischer Speicher sind hohe Investitionskosten und ungenügende spezifische Energiedichte bzw. eingeschränkte Effizienz und Zuverlässigkeit. Die Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Materialforschung, der wärmetechnischen und thermo-mechanischen Auslegung, der Fertigungstechnik und Systemintegration von Wärmespeichern. Hierbei sollte der Fokus auf neuartige Speichertechniken wie Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher gelegt werden. Die verschiedenen Bauarten von saisonalen Wärmespeichern sollten weiter entwickelt werden, um die notwendige Kostenreduktion zu erreichen.

Die großmaßstäbliche Stromspeicherung in adiabatischen Druckluftspeicherkraftwerken ist eine neue Technologie, die insbesondere bei einem hohen Anteil an Windstrom notwendig wird. Erst die Verwendung von großen Wärmespeichern im Temperaturbereich bis 800°C ermöglicht den Einsatz von Anlagen mit hohen Stromspeicherwirkungsgraden von etwa 70%.

Da der Speicher sowohl mit Energiequellen als auch mit Energieverbrauchern in Wechselwirkung steht, wird die Wirtschaftlichkeit stark von der Betriebsstrategie beeinflusst. Daher werden leistungsfähige Auslegungswerkzeuge benötigt, mit deren Hilfe eine optimierte Anpassung des Speichersystems an die übrigen Anlagenkomponenten durchgeführt werden kann.

#### **4.3.2 Erneuerbare Energien für die Wärme- und Kältebereitstellung**

##### **Biomassenutzung**

Biomasse stellt heute den größten Anteil an den in Deutschland genutzten erneuerbaren Energieträgern dar, überwiegend durch die Verbrennung von holzwirtschaftlichen Produkten oder Abfällen. Zukünftig sollte das gesamte Spektrum der einsetzbaren Biomassen pflanzlichen und tierischen Ursprungs einschließlich Mikroalgen genutzt werden. Aus der Vielfalt der Einsatzstoffe sind mittels biotechnologischer oder thermisch-chemischer Umwandlungsprozesse geeignete energiereiche Zwischenprodukte herzustellen. Die in der Biomasse gespeicherte Energie wird in einen hochwertigen chemischen Energieträger umgeformt, der sowohl stoffliche als auch energetische Nutzung erlaubt und daher flexibel auf Marktentwicklungen einstellbar ist. Hierzu sind die folgenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit hoher Priorität erforderlich:

- Agrarwissenschaftliche Arbeiten zur Auswahl und Spezialisierung von geeigneten Biomassen für die energetische und stoffliche Nutzung,
- Grundlagenforschung zu chemischen, thermischen und biologischen Prozessen der Biomasseverwertung,
- Entwicklung und Demonstration von dezentralen und zentralen Verfahren zur effizienten Umwandlung in Nutzenergie,
- Erforschung und ganzheitliche Bewertung der mit der Nutzung eventuell vorhandenen Risikofaktoren.

##### **Geothermie**

Geothermie eignet sich für eine Grundlastversorgung mit Wärme, Kälte oder Strom. Geothermische Wärme kann für kleinere Abnehmer aus oberflächennahen Quellen und für größere Wärmenetze aus tieferen Lagerstätten bereitgestellt werden. Systeme der oberflächennahen Geothermie bestehend aus Erdwärmesonden und Wärmepumpen sind am Markt eingeführt. Zur Verbesserung der Nutzung der tiefen Geothermie werden die folgenden F&E-Leistungen benötigt, um von der vorwettbewerblichen Demonstration zu einer breiteren Marktdurchdringung zu kommen:

- Erkundung und Erschließung von Wärmequellen,
- Verständnis der Fluid-Gestein-Wechselwirkung in Verbindung mit der Hydromechanik der Reservoirs,
- Produktivitätssteigernde Maßnahmen (Enhanced Geothermal Systems), um die erforderliche Wirtschaftlichkeit zu erreichen,
- Erhöhung der Effizienz der Übertageanlagen (z.B. Pumpen, Wärmeübertrager).

Die Komplexität geothermischer Systeme erfordert einen ganzheitlichen Ansatz, der das Zusammenspiel einzelner Komponenten berücksichtigt. Dabei kommt der Entwicklung von Einzelkomponenten und Demonstrationsprojekten, beispielsweise zur EGS-Technologie, eine besondere Bedeutung zu. In Deutschland wurde in mehreren Zentren, außeruniversitären Einrichtungen und Universitäten eine kompetente Forschungslandschaft für Geothermie aufgebaut, die weiter entwickelt werden sollte.

### **Solarthermie**

In Deutschland sind derzeit etwas über 10 Millionen m<sup>2</sup> thermische Solarkollektorfläche installiert, die allerdings nur 0.3% zur insgesamt benötigten Heizenergie beitragen. Um die notwendigen Klimaziele zu erreichen, wird bis 2020 eine Verzehnfachung der installierten Kollektorfläche angestrebt. Dabei wird die solare Wärme in zunehmendem Maß auch für die Unterstützung der Gebäudeheizung eingesetzt.

Die industrielle Nutzung von Solarwärme, zum Beispiel in der Lebensmittelindustrie, Petrochemie oder Erzverarbeitung befindet sich noch in den Kinderschuhen, obwohl auch hier ein signifikantes Potenzial besteht, da ein erheblicher Anteil der benötigten Prozesswärme bei Temperaturen unter 200°C liegt. Diese Temperaturen sind auch in Mitteleuropa mit konventionellen und leicht konzentrierenden Kollektoren zu erreichen. Solare Prozesswärme bei höheren Temperaturen bis über 1000°C, z.B. für die thermochemische Wasserstoffherstellung, kann mit erhöhter Konzentration bereit gestellt werden, die dafür benötigte Direktstrahlung ist allerdings in Mitteleuropa nicht ausreichend vorhanden. Allerdings könnte durch gezielte Fortführung der bereits erfolgten Forschungsarbeiten ein Exportmarkt für deutsche Technologie aufgebaut werden.

Die solare Klimatisierung und Kältebereitstellung hat in den vergangenen Jahren enorm an Interesse gewonnen. Die bisher verfügbaren Anlagen sind häufig wenig effizient und immer deutlich zu teuer. Durch die Kombination von Warmwasseraufbereitung, Heizungsunterstützung und Klimatisierung könnte jedoch eine wesentlich effizientere Nutzung von größeren Solaranlagen auch in den Sommermonaten erfolgen.

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich der solarthermischen Wärme- und Kältebereitstellung wird ausführlich in der strategischen Forschungsagenda der Europäischen und der Deutschen Solarthermischen Technologieplattform beschrieben (ESTTP bzw. DSTTP). Wichtige Aspekte sind:

- die Entwicklung von neuen Materialien und Oberflächenstrukturen für Solarkollektoren in allen Temperaturbereichen,
- Wärme- und Kältespeicher mit hoher Energiedichte und geringen Speicherverlusten als wesentliche Voraussetzung für alle solarthermischen Anwendungen, und
- mathematische Modelle und Regelalgorithmen für die optimale Einbindung der fluktuierend anfallenden solaren Wärme in industrielle Prozesse.

#### **4.3.3 Rahmenbedingungen**

Das Forschungs- und Entwicklungsgebiet „nachhaltige Wärme- und Kältebereitstellung“ ist im Vergleich zu Stromherstellung und Mobilität chronisch unterfinanziert, obwohl seine Umweltrelevanz und wirtschaftliche Bedeutung hinter diesen nicht zurücksteht. Im Gegenteil ist das Potenzial, gerade in diesem Gebiet bereits mittelfristig einen erheblichen Beitrag zu den Emissions- und Ressourcenschutzzielen zu leisten, wahrscheinlich größer

als in anderen Gebieten. Klare politische Rahmenbedingungen und längerfristige, planbare Förderung für Forschungsprogramme und Markteinführung sind notwendig. Eine deutlich erhöhte F&E-Förderung ist deshalb angebracht, da die mit Wärme und Kälte verbundenen internen und externen Kosten für die deutsche Volkswirtschaft enorm sind.

Forschung und Entwicklung zum Themenblock Wärme- und Kältebereitstellung sind sinnvollerweise über die gesamte deutsche Forschungslandschaft von Hochschulen, Fraunhofer, Helmholtz bis hin zu kleinen/mittelständischen Unternehmen und Großindustrie verteilt. Allerdings gibt es zahlreiche Gebiete von hoher Bedeutung (z.B. Massenprozesse wie Zementherstellung, industrielles Wärmemanagement, tiefe Geothermie, etc.), die strategische, längerfristige Lösungsansätze mit substanziellem Aufwand an Personal und Infrastruktur erfordern. Gerade für solche Fragestellungen sollten zukünftig zusätzliche Förderstrukturen aufgelegt werden, um eine kleinteilige und damit wenig effiziente und nur bedingt zielführende Verwendung von Fördermitteln zu vermeiden.

# 5. POLITISCHE STEUERUNG, EVALUIERUNG UND FORSCHUNGSINFRASTRUKTUR

## Leitsätze:

- Dringend erforderlich ist eine „Energieforschungspolitik aus einem Guss“ mit hoher Kohärenz und Verlässlichkeit; sie sollte zugleich flexibel gegenüber sich ändernden Randbedingungen reagieren.
- Entsprechend der Bedeutung der Energie-, Klima- und Umweltproblematik ist ein signifikanter und nachhaltig wirksamer Aufwuchs der Mittel für Forschung und Ausbildung notwendig.
- Eine transparente Bewertung der in Deutschland vorhandenen Forschungseinrichtungen auf einer dem jeweiligen Themengebiet angepassten Bewertungsskala kann zu einer sinnvollen und effektiveren Aufgabenteilung beitragen.
- Eine gezielte Förderung von Themenclustern zwischen universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen nach Exzellenzkriterien verbessert die Zusammenarbeit und erleichtert die Schwerpunktbildung.
- Die Forschungsförderung sollte zum Erhalt der kritischen Masse für alle relevanten Energieträger (fossil, nuklear, regenerativ) beitragen und frei von ideologischen oder parteitaktischen Einflüssen sein.
- Eine Intensivierung der sozioökonomischen Begleitforschung ist im Kontext einer zukunftsorientierten und themenoffenen Energieforschung sehr wünschenswert und sinnvoll.

## 5.1 „Energieforschungspolitik aus einem Guss“

Eine zukunftsorientierte Energiepolitik sollte sich an den gesellschaftlichen Bedürfnissen orientieren und vor allem in sozialer, ökologischer und ökonomischer Hinsicht dem Ziel der nachhaltigen Entwicklung dienen. Hierzu sind die vielfältigen Randbedingungen in der Energiebereitstellung und Energienutzung zu berücksichtigen. Unstrittig ist, dass Entscheidungen in der Energiepolitik zu weitreichenden Konsequenzen führen und i. d. R. mit einer langfristigen Bindung erheblicher Mittel verbunden sind. Vor diesem Hintergrund ist eine verlässliche, kohärente und langfristig ausgerichtete Energiepolitik seitens der politischen Entscheidungsträger unerlässlich. Das setzt voraus, dass einer bestmöglichen Abstimmung zwischen den verschiedenen politischen Ressorts eine hohe Bedeutung zukommt.

Effiziente, Ressourcen schonende Energiebereitstellung und -nutzung hängen unmittelbar von technologischen Entwicklungen ab und setzen deshalb umfangreiche vorausschauende Forschungsanstrengungen voraus. Diese sollten im Sinne einer echten, alle Entscheidungsoptionen offen haltenden Vorsorgeforschung in großer Breite angelegt sein. Die forschungspolitische Komponente der Energiepolitik sollte außerdem die Entwicklungen in einem globalisierten Energiemarkt und die Entwicklungen der internati-

onalen Energieforschung berücksichtigen und auch antizipieren können. Dies erfordert in hohem Maße eine internationale Vernetzung der relevanten Forschungspartner und eine kontinuierliche Kommunikation zwischen Politik, Forschung und Wirtschaft.

Die ehrgeizigen inhaltlichen Ziele können jedoch nur dann erreicht werden, wenn nach einer langen Phase der weitgehenden Stagnation ein signifikanter und nachhaltig wirksamer Aufwuchs in der Mittelbereitstellung für Forschung und Ausbildung sichergestellt werden kann. Damit sollten Rahmenbedingungen geschaffen werden, um die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Forschung in diesem Bereich zu stärken. Im Hinblick auf die klimabezogene Diskussion und das vorhandene technologische und ökonomische Potenzial gehört hierzu auch ein Forschungsspektrum, das nur von Daten und Fakten geprägt ist.

Zur besseren Koordination wird empfohlen, einen mit Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Ministerien hochrangig besetzten Energieforschungsbeirat der Bundesregierung einzurichten, der die nationale Energieforschungspolitik im internationalen Kontext koordiniert und mit weitreichenden Befugnissen ausgestattet ist. Auf diese Weise können vermutlich eine kohärente und sehr effiziente Energieforschungspolitik und damit ein wirkungsvoller Mitteleinsatz erreicht werden.

## 5.2 Bewertung der Forschungsstrukturen im Energiebereich

Eine wichtige Voraussetzung für eine strukturell abgestimmte und fokussierte Forschungsförderung im Energiebereich ist die transparente Bewertung der in Deutschland vorhandenen Forschungseinrichtungen auf einer dem jeweiligen Themengebiet angepassten Bewertungsskala. Eine solche Bewertung kann zu einer maßgeschneiderten und effizienten Aufgabenteilung und zu einer entsprechend angepassten Förderpolitik beitragen.

Hierzu wird es erforderlich sein, die vorhandenen Forschungsstrukturen zu erfassen und deren strategische Bedeutung, wissenschaftliche Leistungsfähigkeit und Anwendungsrelevanz zu bewerten. Als Grundlage einer solchen Evaluierung bietet sich die Nutzung des vom Wissenschaftsrat erarbeiteten und bereits geprüften Forschungsratings an ([http://www.wissenschaftsrat.de/pilot\\_start.htm](http://www.wissenschaftsrat.de/pilot_start.htm)). Dieses System bewertet qualitative und quantitative Leistungsparameter in den Bereichen Forschung, Technologietransfer und Nachwuchsförderung. Es ermöglicht u. a. die Bewertung bzw. Würdigung langfristig angelegter Forschungsinitiativen, wie z. B. den Aufbau großer Forschungsinfrastrukturen, die gerade im internationalen Wettbewerb und unter strategischen Gesichtspunkten von größter Bedeutung sind. Eine Harmonisierung dieses Prozesses mit den Evaluationsstrukturen, die in der Helmholtz-Gemeinschaft etabliert wurden, ist hierbei anzustreben.

Die Nutzung fachspezifischer Kommunikationsplattformen, die den Informationsaustausch und die gegenseitige Abstimmung fördern, sollte ein ergänzendes Instrument sein, wie etwa in der Initiative COORETEC.

## 5.3 Bessere Verzahnung universitärer und außeruniversitärer Forschung

Die föderale Struktur der Bundesrepublik erschwert eine kohärente Forschungspolitik und die überregionale Bündelung von Forschungskapazitäten. Die heute noch schwach

ausgeprägte Vernetzung hat sicher auch historische Gründe gerade im Hinblick auf die Trennung universitärer und außeruniversitärer Forschung. Mögliche Synergien einer intensiven Kooperation im Bereich von Forschung und Nachwuchsförderung werden von beiden Bereichen nicht stringent genug genutzt. Die Schaffung von geeigneten Anreizen kann sehr viel dazu beitragen, solche Kooperationen zu stimulieren und strukturelle Defizite vor allem an den Universitäten zu kompensieren. Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, im Falle vorhandener Kooperationsbereitschaft und bei gegebener Forschungsleistung, den Ausbau enger Forschungsk Kooperationen bzw. die Bildung von Forschungs-Clustern wissenschaftlich und administrativ sowie infrastrukturell gezielt zu fördern. Herausragende Beispiele hierfür sind die Etablierung des Energiezentrums des KIT und die JARA-Energie-Initiative.

#### 5.4 Förderung großer Forschungsinfrastruktur

Ein großer Teil der im Bundeshaushalt für Energieforschung zur Verfügung stehenden Forschungsmittel fließt der Helmholtz-Gemeinschaft zu. Das Fördervolumen spiegelt hierbei auch die mit Energieforschung i. d. R. verbundenen großtechnischen Anforderungen wider, die naturgemäß nur durch die an den Helmholtz-Zentren vorhandene Infrastruktur sinnvoll umgesetzt werden können. Hierbei haben sich in den letzten Jahren insbesondere im Hinblick auf Forschungsarbeiten zu regenerativen Energien beachtliche Verschiebungen im Portfolio ergeben.

Die in der Helmholtz-Gemeinschaft vorhandene große Forschungsinfrastruktur bietet sich hierbei als Nukleus für die im vorigen Unterkapitel beschriebenen Forschungsk Kooperationen an. Sie sollte gleichzeitig stärker als bisher als Kristallisationspunkt für regionale Cluster und damit für die Profilschärfung der Zentren genutzt werden. Auf dieser Basis können die für den weiteren Ausbau und die Entwicklung großer Forschungsinfrastrukturen benötigten Mittel stärker themen-, profil- und leistungsorientiert fokussiert werden.

Um die Kooperationsbereitschaft nachdrücklich zu fördern, sollte allerdings auch das Förderinstrument der „Programmorientierten Förderung (PoF)“ der Helmholtz-Gemeinschaft angepasst werden. Das bisherige PoF-Konzept ist eher auf Konkurrenz und Abgrenzung als auf Kooperation und gemeinsame Ressourcennutzung ausgelegt. Eine entsprechende Reform der PoF und die Schaffung einer Zentren-übergreifenden, gemeinsam gestalteten Koordinationsstruktur könnten diesen Mangel beseitigen helfen. Dabei sollten natürlich die Besonderheiten und speziellen Interessenslagen der einzelnen Zentren im regionalen Kontext Berücksichtigung finden. Die Entwicklung einer weitergehenden Kooperationskultur kann auch durch zusätzliche Anreize z.B. aus dem Impuls- und Vernetzungsfond der Helmholtz-Gemeinschaft nachdrücklich unterstützt werden.

#### 5.5 Vernetzung auf europäischer (internationaler) Ebene

Ein kohärentes Energieforschungskonzept aus einem Guss bietet die besten Voraussetzungen, um eine stärkere Vernetzung der heimischen Energieforschung mit Akteuren im europäischen und im internationalen Raum zu erzielen. Eine einseitige Ausrichtung auf „politisch gewünschte Energieumwandlungsformen“ hat die Attraktivität deutscher

Forschungspartner auf den „nicht gewünschten Gebieten“ beeinträchtigt. Durch die Auswahl strategischer Forschungspartner auf europäischer und internationaler Ebene und durch finanzielle Unterstützung entsprechender Initiativen kann die deutsche Energieforschung ihre Sichtbarkeit über die zweifellos vorhandene technisch-wissenschaftliche Expertise hinaus sowohl im gesellschaftlichen als auch im politischen Kontext deutlich verbessern und insbesondere als „Wissenschaftsbotschafter“ Wegbereiter für den Zugang zu neuen Märkten sein. Die deutsche Wissenschaft muss in allen wesentlichen europäischen Technologieplattformen angemessen vertreten sein, um die deutschen Ideen zu platzieren und die europäischen Strategien direkt mitzugestalten.

## 5.6 Anwendungsoffene Forschung

Im Kontext sich schnell ändernder politischer, sozioökonomischer und wissenschaftlich-technischer Rahmenbedingungen sollten alle relevanten Energieträger im Hinblick auf den künftig erforderlichen, aber nicht hinreichend vorhersehbaren Energiemix behandelt, entsprechendes Know How vorgehalten und vorhandene Forschungsstrukturen dem wirklichen Bedarf entsprechend zeitnah ausgebaut werden. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist eine anwendungsoffene Forschungsförderung, die alle relevanten Energieträger (regenerativ, fossil, nuklear) sowie die dazugehörigen Technologien berücksichtigt und sicherstellt, dass in allen Bereichen die kritische Masse für erfolgreiche technologische Entwicklungsarbeit vorhanden ist. Nur durch diese offene Forschungsförderung können bei wechselnden (global)politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen oder bei neuen Erkenntnissen aus der Klima- und Umweltforschung jeweils bestmöglich angepasste Lösungen rechtzeitig angeboten und umgesetzt werden. Mit der Möglichkeit einer anwendungsoffenen Forschungsförderung verbinden sich direkt die Fragen nach der technologischen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands, nach den im Bereich der Energienutzung geforderten Sicherheitsstandards und nach den Folgen einer Abhängigkeit von externen Märkten und Technologien.

Es wäre sehr wünschenswert, wenn die Energieforschung von ideologischen oder parteitaktischen Einflüssen freigehalten werden könnte, um den Entscheidungsspielraum für künftige Generationen nicht unnötig einzuengen.

## 5.7 Zur Rolle der sozioökonomischen Forschung im Bereich Energie

Die gesellschaftliche Akzeptanz spielt bei der Einführung neuartiger, insbesondere komplexer Technologien sowie bei Bezügen zum individuellen Verhalten eine zunehmend größere Rolle. Die aktuelle Diskussion zum Thema CCS, zur Kernenergienutzung oder zur Kernfusion zeigt, dass hierbei verschiedenste Akteure aufgrund zum Teil völlig unterschiedlicher Motivationen und Wahrnehmungen in die öffentliche Diskussion eingreifen und sehr verschiedenartige Bedürfnisse und „Erkenntnisse“ artikulieren. Dabei ist einerseits immer wieder zu bemerken, dass zu neuartigen Technologien große Informationsdefizite bestehen und auf das gesellschaftliche Bedürfnis, Antworten auf sicherheitsrelevante Fragen zu erhalten, nicht zeitgerecht und inhaltlich adäquat eingegangen wird. Andererseits besteht ein großer Bedarf nach transparenten Entscheidungsverfahren und nach Beteiligungsmöglichkeiten, z.B. im Rahmen von Anhörungen oder Bürgerdialogen. Daraus leitet sich ein erheblicher Bedarf nach einer systemisch,

d. h. ganzheitlich ausgerichteten, sozioökonomischen Begleitforschung ab, die sowohl die gesellschaftlichen Aspekte der Energietechnologien als auch die Prozesse der Meinungsbildung und Entscheidung in den Blick nimmt. Sie sollte daher ein obligater Bestandteil einer zukunftsorientierten und anwendungs offenen Energieforschung werden.

Entscheidungen in Energiepolitik und Energieforschung in Bezug auf Technologien und Infrastrukturen für Energiebereitstellung und Energieumwandlung erfolgen im Hinblick auf teils weit entfernte Zukünfte. Beispiele sind die Bewertung der Erschöpfung fossiler Energieträger, die Aussichten auf die Wettbewerbsfähigkeit erneuerbarer Energieträger, die Formulierung von Klimazielen durch Senkung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Sicherung der wirtschaftlichen Versorgung angesichts geopolitischer Verschiebungen, Potenziale und Risiken der Wasserstoffwirtschaft, langfristige Überlegungen zur Rolle der Fusionstechnologie, etc. Belastbare und möglichst gut begründete Zukünfte (z.B. Szenarien) sind aber notwendig, um eine langfristig verlässliche Energiepolitik zu orientieren. Auch in dieser Hinsicht ist eine sehr viel intensivere und stark interdisziplinär angelegte sozioökonomische Begleitforschung erforderlich, die eine umfassende Energiesystemanalyse und Technikfolgenabschätzung einschließt und zu einer sehr viel stärker systemisch orientierten Betrachtungsweise führt.

## 6. POSITIONIERUNG IM INTERNATIONALEN UMFELD

### Leitsätze:

- Die deutsche Energieforschung sollte sich effizienter und themenorientiert in den europäischen Forschungsraum einbringen. In strategisch wichtigen europäischen Programmen sollte eine Führungsrolle erreicht werden.
- Internationale Kooperationsanstrengungen sollten auf exzellenzbasierte Zusammenarbeiten, die wissenschaftliche Synergien erbringen, und auf Kooperationen mit Regionen fokussiert werden, deren Energiemarkt einen wachsenden Bedarf an innovativen Lösungen benötigt oder aufweist.

### 6.1 Europäischer Forschungsraum

Die europäische Förderungslandschaft für die Energieforschung befindet sich zur Mitte des 7. Forschungsrahmenprogramms in einem Umbruch, der bis zu Beginn des 8. Forschungsrahmenprogramms weitgehend abgeschlossen sein soll. Das zentrale Element ist der „Strategische Energietechnologieplan (SET-Plan)“ und die Absicht der Kommission, das sog. „Joint Programming“ einzuführen. Im Rahmen des SET-Plans werden sowohl Prioritätsthemen für die europäische Energieforschung als auch neue Instrumente für die programmbezogene Forschung vorgeschlagen. Die detaillierten Prioritätsthemen des SET-Plans spiegeln die Themen des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung wider und erlauben eine nahtlose Kooperation auf europäischem Niveau. Es ist allerdings Vorsicht geboten, wenn europäische Überreglementierung und politikbestimmte Kompromisse die nationalen forschungspolitischen Anstrengungen nachteilig beeinflussen.

Maßgebliche Instrumente für die zukünftige programmbezogene europäische Forschungsförderung können die Industrieinitiativen, Technologieplattformen und die Europäische Energieforschungsallianz (EERA) sein.

Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Im Hinblick auf das „Joint Programming“ sollte den deutschen Forschungsorganisationen eine Schlüsselrolle zufallen, da diese aufgrund ihrer kritischen Masse einen besonders starken Einfluss ausüben können, der über die Möglichkeiten einzelner Institute/Zentren hinausgeht.
- Eine enge Abstimmung zwischen der nationalen politischen Ebene, über welche im Lenkungsausschuss des SET-Plans die Weichen für das Joint Programming gestellt werden, und den Akteuren auf der Forschungsseite ist unverzichtbar, damit die deutsche Energieforschung bestmöglich in den europäischen Rahmen integriert wird.
- Für effiziente und nachhaltige programmbezogene europäische Forschung ist ein stabiles nationales Förderungsumfeld notwendig, das u.a. mit einem Anreizsystem nicht nur das „Mitmachen“ sondern insbesondere das „Gestalten“ und „Leiten“ fördert.
- Deutschland sollte bereit sein, verstärkt in nationale und europäische Energieforschungsinfrastrukturen zu investieren. Diese Unterstützung ermöglicht es, Schlüsselstrukturen in Deutschland zu platzieren und hierdurch die besten europäischen

Forschungskapazitäten einzubinden und international führende Wissenschaftler anzuziehen. Der daraus resultierende Innovationsvorteil für die deutsche Energie- und Anlagenindustrie könnte ein Vielfaches der jeweiligen Investition betragen.

Die europäische Förderung der Fusionsforschung nimmt in diesem Kontext eine Sonderrolle ein, da dort das „Joint Programming“ bereits in vollem Umfang durchgeführt wird.

## 6.2 Strategische internationale Kooperationen

Im internationalen Bereich besteht eine Vielzahl an vorwiegend bilateralen Kooperationen zur Energieforschung. Hierbei sind die in der Energieforschung tätigen deutschen Institutionen international gesuchte Partner für exzellenzbasierte Zusammenarbeiten. Diese Kooperationen führen in der Regel zu wissenschaftlichen Synergien, von denen die deutsche Forschung wesentlich profitiert.

Zusätzlich sollten vornehmlich themenbezogene Zusammenarbeiten mit Regionen unterstützt werden, in denen ein massiver Bedarf an innovativen Lösungen für die aufkommenden Energieprobleme entsteht. Hierdurch kann der nachfolgende Zugang für industrielle Lösungen vorbereitet und erleichtert werden.

Eine strukturierte und stringent durchgeführte Förderung von strategischen Zusammenarbeiten durch die Politik sollte sich daher überwiegend an den Ansätzen für „Exzellenzkooperationen“ und „innovationsgetriebene Kooperationen“ orientieren.

Neben der erfolgreichen Gestaltung der kerntechnischen Forschung in EURATOM durch deutsche Forschungseinrichtungen ist die internationale Kooperation für ITER besonders hervorzuheben, bei der der europäische Beitrag durch die deutsche Fusionsforschung massiv unterstützt wird. Diese Unterstützung wird langfristig notwendig sein, um das ITER-Projekt und die weitere Entwicklung der Kernfusion zum Erfolg zu führen.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE WEITERENTWICKLUNG

Die Energieversorgung der Zukunft kann nicht als gesichert gelten, weder global noch national. Insbesondere sind die Anforderungen an eine nachhaltige Energieversorgung – Sicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umwelt- und Klimaverträglichkeit und Zugangsgerechtigkeit – heute nicht erfüllt.

Eine nachhaltige und zukunftssichere Energieversorgung ist nicht kurzfristig erreichbar. Über längere Zeit wird deshalb ein Energiemix die Versorgung sicherstellen müssen, der unter Nutzung innovativer und hocheffizienter Technologien sukzessive optimiert werden muss.

Die Frage, wie eine nachhaltige Energieversorgung der Zukunft erreicht werden kann und wie diese aussieht, ist umstritten und wird von verschiedenen Protagonisten und in den einzelnen Ländern sehr unterschiedlich beantwortet. Die Beantwortung dieser Frage wird auch stark davon abhängen, wie sich die politischen, sozioökonomischen, klimatischen, umweltrelevanten und wissenschaftlich-technischen Randbedingungen zukünftig entwickeln; sie kann deshalb zeitlichen Änderungen unterliegen. Niemand ist heute imstande, sichere Prognosen für die Situation in 20, 50 oder gar 100 Jahren abzugeben.

Die Energieforschung sollte daher alle technologisch sinnvollen Optionen für eine nachhaltige Energieversorgung und Nutzung weiterentwickeln und mit dem Ziel der Nachhaltigkeit dazu beitragen, das Gesamtsystem unter Beachtung aller Umwandlungs-, Transport-, Speicher-, Nutzungs- und Entsorgungsprozesse zu optimieren. Eine breit angelegte Energieforschung und Entwicklung neuer Energietechnologien ist auch deshalb notwendig, um künftigen Generationen möglichst viele Handlungsoptionen gemäß den dann herrschenden Randbedingungen offen zu halten.

Die deutsche Industrie nimmt in der Energietechnik eine weltweit führende Rolle ein. Die öffentliche Energieforschung sollte die Industrie weiterhin intensiv unterstützen und ihr so ermöglichen, die großen globalen Exportpotenziale auszunutzen.

Aus diesen Prämissen ergibt sich für die deutsche Energieforschungspolitik aus Sicht der Helmholtz-Gemeinschaft ein Bündel von Handlungsempfehlungen, die nachfolgend zusammengestellt sind. Diese Empfehlungen basieren auf der vorhandenen Forschungsinfrastruktur, berücksichtigen die jüngsten Entwicklungen und Erkenntnisse und haben eine Weiterentwicklung des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung im Auge.

### 7.1 Empfehlungen zum Thema Stromversorgung

- Damit die Erneuerbaren Energien, die viele wichtige Nachhaltigkeitsvoraussetzungen erfüllen, weltweit zum tragenden Pfeiler der Stromerzeugung werden können, sind noch viele wissenschaftliche und technologische Fortschritte erforderlich. Diese sollten zum einen die Wirtschaftlichkeit einschließlich der Effizienzverbesserung, Langzeitstabilität, Materialfragen und Herstellungsprozesse und zum anderen die Markt-

einführung einschließlich der Fragen zur Akzeptanz, Umweltverträglichkeit und zur Ressourcenschonung betreffen. Speziell sollte sich die deutsche Forschungsförderung vor allem auf die Weiterentwicklung der Photovoltaik und der konzentrierenden Solarthermie sowie auf die Exploration der tiefen Geothermie und der Biomassenutzung konzentrieren, wobei die Akzente entsprechend der Marktreife unterschiedlich gesetzt werden können. Vielversprechende Beiträge zu anderen Energiebereitstellungswegen (z.B. zu Offshore Windkraftanlagen) sollten durch geeignete Fördermaßnahmen jederzeit gute Entwicklungschancen erhalten oder gezielt stimuliert werden.

- Fossile Energieträger werden noch lange Zeit eine bedeutende Rolle für die Stromerzeugung spielen. Damit dies mit den Klimazielen vereinbar ist, sollten die Entwicklung und der Einsatz von Technologien zur umweltgerechten Förderung, zur Effizienzsteigerung, zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung, zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung und zur sicheren CO<sub>2</sub>-Speicherung hohe Priorität haben. Die Forschung in diesem Bereich ist jedenfalls ausbaufähig. Insbesondere sollten auch neue Ideen und unkonventionelle Ansätze zur Handhabung des CO<sub>2</sub>-Problems exploriert und gefördert werden. Die Forschung und Entwicklung in diesem Bereich ist auch aus wirtschaftlichen Gründen attraktiv, da sich bei zunehmender Klimaproblematik große Märkte öffnen, vor allem in aufstrebenden Ländern mit großem Energiehunger und hohem fossilen Brennstoffverbrauch.
- Eine nachhaltige globale Nutzung der Kernspaltung erfordert weiterhin sichere neue Kraftwerksgenerationen und die sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle, wozu die Forschung in Deutschland bisher wesentliche Beiträge geliefert hat und weiterhin liefern sollte. Die bisher nicht vom Bund geförderte Forschung an neuen Generationen von Kernkraftwerken (Generation IV) mit geschlossenen Brennstoffkreisläufen kann sowohl die Ausnutzung der Kernbrennstoffe und damit deren Verfügbarkeit um ein bis zwei Größenordnungen steigern, als auch die Menge und Abklingzeiten der radioaktiven Abfälle drastisch reduzieren.
- Gelingt es, die Kernfusion technisch und wirtschaftlich zu beherrschen, kann zukünftigen Generationen eine nahezu unerschöpfliche und sichere Energiequelle bereitgestellt werden. Die in den letzten Jahren signifikant gestiegene Wahrscheinlichkeit für den Erfolg der Fusion rechtfertigt die bisherige Forschungsförderung und ermutigt zur weiteren nachdrücklichen Förderung dieser Option.
- Der wirtschaftliche Erfolg und die Durchsetzungsfähigkeit der Erneuerbaren Energien und der Elektromobilität werden entscheidend davon abhängen, ob es gelingt, die zunehmend stärker fluktuierenden Strom-Einspeisungen und Entnahmen in den Griff zu bekommen. Hierzu sind neue verlustarme Übertragungstechniken über große Strecken, schnell und sicher geregelte Netze, neue Netzkonzepte (z.B. „Smart Grids“) und neue Stromspeicher dringend erforderlich, die z.T. noch einen erheblichen Forschungsbedarf haben. Neue Ideen aus der Grundlagenforschung (z.B. zu solar erzeugten Brennstoffen) bedürfen langfristig ausgerichteter Förderstrategien.
- Alle Forschungen und technologischen Entwicklungen, die zu einer signifikanten Steigerung der Umwandlungs-, Transport- und Nutzungseffizienz unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten führen und die erforderlichen Qualitätsstandards erfüllen, sollten entsprechend ihrer Potenz und ihres Entwicklungsstadiums eine adäquate Förderung erhalten, wobei der Kreativität keine Grenzen gesetzt sein dürfen, die Umsetzung aber stets im Auge behalten werden sollte.

## 7.2 Empfehlungen zum Thema Mobilität

- Elektromobilität, einschließlich Hybridantrieben, hat das Potenzial, bei Verwendung nachhaltig erzeugter Energieträger langfristig eine Wende hin zu nachhaltiger Mobilität zu erreichen. Dies gilt insbesondere, wenn eine Integration in bestehende Verteilungsnetze und in die stationäre Energieversorgung gelingt. Allerdings sind hierzu große Forschungsanstrengungen in den Bereichen Antriebe, Netze und Speichertechnologien vonnöten, die zu einem wesentlichen Teil durch öffentlich geförderte Forschungseinrichtungen unternommen werden sollten.
- Die heute eingesetzten Techniken zur Mobilität weisen deutliche Optimierungspotenziale auf, die parallel zur Elektromobilität entwickelt werden müssen (Effizienzsteigerung konventioneller Antriebe, Leichtbau, Aerodynamik), wozu auch die öffentlich geförderten Forschungseinrichtungen maßgeblich beitragen können.
- CO<sub>2</sub>-neutrale, nicht-fossile Kraftstoffe sind für alle Verkehrssysteme anzustreben. Langfristig sind sie vor allem für den Flugverkehr relevant, bei dem eine Elektrifizierung nicht realistisch erscheint. Die Entwicklung synthetischer Kraftstoffe, z.B. aus Rest-Biomasse oder über neue Syntheserouten unter effizienter Ausnutzung erneuerbarer Energien oder Abwärme, stellt eine große Forschungs Herausforderung dar, die eine ausreichende Förderung benötigt.

## 7.3 Empfehlungen zum Thema Wärme- und Kälteversorgung

- Das größte Einsparpotenzial beim Verbrauch fossiler Brennstoffe und bei den damit verbundenen Emissionen besteht in einer starken Verminderung des Wärmebedarfs von Gebäuden, wozu Forschung und Entwicklung einige gezielte Beiträge leisten können.
- Die Effizienzerhöhung thermischer Prozesse, der Einsatz von Wärmespeichern, die Nutzung von Wärmequellen auf verschiedensten Temperaturniveaus und der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) bieten ein hohes Einsparpotenzial. Sie sollten deshalb verstärkt vorangetrieben werden, wozu gezielte Forschungsanstrengungen und Förderanreize nötig sind.
- Auch im Bereich der nachhaltigen Wärme- und Kälteversorgung müssen die erneuerbaren Energien (Solarthermie, Geothermie, Biomasse) wesentlich größere Beiträge leisten. Effiziente und wirtschaftliche thermische Speicher spielen dabei eine Schlüsselrolle. Diese erfordern bis zum wirtschaftlichen Einsatz jedoch noch große F&E Anstrengungen, die in die Förderpolitik stärker einbezogen werden sollten.

## 7.4 Empfehlungen zum Thema sozioökonomische Begleitforschung

- Mit der zunehmenden Komplexität wächst der Bedarf an Analyse und Optimierung von Energiesystemen auf der nationalen und europäischen Ebene, z.B. in Bezug auf Robustheit und Effizienz sowie im Hinblick auf Innovation und Markteinführungsstrategien. Die Behandlung und Optimierung von Einzelkomponenten sollte

zunehmend durch eine systemische Betrachtungsweise ersetzt und durch die Untersuchung von Energiezukünften erweitert werden, wobei die sozioökonomische Forschung eine wichtige Rolle spielen sollte.

- Zur Umsteuerung auf Systemebene ist Forschung gefordert, z.B. in Bezug auf neue Infrastrukturen oder in Bezug auf größere Änderungen im Gesamtsystem („transition management“). Parallel sollte Forschung zu „Energie und Gesellschaft“ erfolgen, denn jenseits technischer Fragen sind gesellschaftliche Rahmenbedingungen zu beachten (z.B. zur Akzeptanz von Kernenergie, CCS, Geothermie und Windenergie).

## 7.5 Forschungspolitische Handlungsempfehlungen

- Nachdrücklich empfohlen wird eine „Energieforschungspolitik aus einem Guss“ mit hoher Kohärenz und Verlässlichkeit. Dazu wäre es sehr wünschenswert, wenn die Zuständigkeiten in möglichst wenigen Händen lägen und die Koordination der deutschen Förderaktivitäten signifikant verbessert würde. Ein aus Wissenschaft und Wirtschaft hochkarätig besetzter externer Beirat der Bundesregierung mit Beratungs- und Entscheidungskompetenz könnte diesbezüglich hilfreich sein. Zur Kohärenz gehört die klare Abgrenzung zwischen öffentlicher Förderung und entsprechenden komplementären Industrienanstrengungen. Außerdem sollte die Förderpolitik über den nationalen Rahmen hinaus der internationalen Dimension verstärkte Bedeutung beimessen. Zur Verlässlichkeit gehören langfristige Förderstrategien, die mit Ressourcen ausgestattet werden, welche der Größenordnung des Energie- und Umweltproblems Rechnung tragen.
- Die thematischen Schwerpunkte der Förderung sollten in einem Strategieprozess gemeinsam mit den Akteuren bestimmt werden. Dies führt zur maximalen Effizienz der eingesetzten Ressourcen und zur besseren Abstimmung und Kooperation. Auch hier könnte ein hochkarätiger Beirat zur Schwerpunktsetzung und Effizienzsteigerung signifikant beitragen.
- Die Zusammenarbeit zwischen Forschungszentren, Universitäten, anderen Forschungseinrichtungen und Industrie sollte durch gezielte Anreize intensiviert werden. Dabei sollte dem Aspekt der Aus- und Weiterbildung eine gesteigerte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Zum Beispiel könnte eine Förderung von Themenclustern zwischen universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen nach Exzellenzkriterien Zusammenarbeiten stimulieren, Schwerpunktbildungen erleichtern und Ausbildungsaspekte einbeziehen.
- Entsprechend der Bedeutung der Energie-, Klima- und Umweltproblematik ist ein signifikanter und nachhaltig wirksamer Aufwuchs der Mittel für Forschung, Entwicklung und Ausbildung notwendig.

Zusammenfassend wird nachdrücklich empfohlen, alle aussichtsreichen Optionen für eine nachhaltige Energieversorgung durch entsprechende, deutlich intensivere Forschungsanstrengungen und Entwicklungsarbeiten zu verfolgen, um langfristig planen, entwickeln und exportieren zu können, um zukunftsfähig zu werden und um zukünftigen Generationen genügend Gestaltungs- und Entscheidungsspielraum zu geben. Die Forschungsförderung sollte zum Erhalt der kritischen Masse für alle relevanten Energieträger (regenerativ, fossil, nuklear) beitragen und frei von ideologischen oder parteitaktischen Einflüssen sein.



[www.helmholtz.de/forschung/energie](http://www.helmholtz.de/forschung/energie)