

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina/
Nationale Akademie der Wissenschaften
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
(für die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften)

Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland

2009



Leopoldina
Nationale Akademie der Wissenschaften



DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



berlin-brandenburgische
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Zusammenfassung (Executive Summary)	5
Teil I: Einleitung	9
– Ausgangssituation	9
– Der systemische Ansatz der Energieforschung als zentrales Element	13
– Notwendige Prämissen der Energieforschung	14
– Aufbau dieses Energieforschungskonzepts	15
Teil II: No Regret-Forschungsschwerpunkte	17
– Einleitung	17
– Die energieeffiziente Stadt als integrativer Forschungsansatz	17
– Innovationen und Marktdurchdringung	22
– Ziele und Instrumente	22
– Nutzerverhalten und Konsum	24
Teil III: Forschungspotenziale für eine langfristig gesicherte und nachhaltige Energiezukunft	25
– Einleitung	25
– Modul 1: Erneuerbare Energien	26
– Modul 2: Fossile Energien	33
– Modul 3: Kernenergie	43
Teil IV: Wissenschaftliche Querschnittsthemen für den Übergang zu einer nachhaltigen Energiegesellschaft	48
– Naturwissenschaftliche Grundlagen von Energietransferprozessen	48
– Szenarienbildung und Krisenmanagement	49
– Märkte, Staat und Zivilgesellschaft (Governance)	50
– Technikfolgenabschätzung und Risikoanalyse	51
Teil V: Leitlinien für eine integrative Energieforschung	52
– Grundsätzliche strukturelle Anforderungen	52
– Handlungsempfehlungen	53
– Empfehlungen für die staatliche Forschungsförderung	54
– Kapazitäten für die Nachwuchsförderung	55
Teil VI: Ausblick	57
Anhang	58

IMPRESSUM:

Herausgeber:

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
Emil-Abderhalden-Str. 37
06108 Halle/Saale

acatech – DEUTSCHE AKADEMIE
DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Geschäftsstelle
Residenz München
Hofgartenstr. 2
80539 München

Hauptstadtbüro
E-Werk, Bauteil E
Mauerstr. 79
10117 Berlin

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Jägerstr. 22/23
10117 Berlin

Layout und Satz:

PM-GrafikDesign
Im alten Weg 7
63607 Wächtersbach

Druck:

Seltersdruck GmbH
65618 Selters/Ts.

2009

Zusammenfassung (Executive Summary)

Die Energieforschung in Deutschland muss alle Optionen für die **zukünftige Energieversorgung** im Spannungsfeld von **Klima- und Umweltschutz** und **Versorgungssicherheit** zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten bereitstellen. Nur so eröffnet sie der Politik einen langfristigen Handlungs- und Entscheidungsspielraum. Hierbei liegen Schwerpunkte der Forschung sowohl auf der Angebotsseite (Bereitstellung und Verteilung) wie auch auf der Nachfrageseite (Anreize für nachhaltige Energieversorgung, neue Konsummodelle und Akzeptanz durch Regierungen, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Individuen).

Um den Weg für die Umsetzung zukünftiger Technologieoptionen und Maßnahmen offenzuhalten, muss die Forschung dabei die Unabhängigkeit besitzen, auch über längere Zeiträume Aspekte zu bearbeiten, die gegenwärtig nicht im Mittelpunkt der politischen Handlungsoptionen liegen. Dies ist besonders dringend vor dem Hintergrund, dass die politischen, sozioökonomischen, ökologischen und klimatischen Randbedingungen und Handlungsoptionen der Politik für die nächsten 20, 50 oder gar 100 Jahre kaum vorhersehbar sind.

Bei der Betrachtung der gegenwärtigen Forschungslandschaft wird deutlich, dass häufig – meist rein technologische – Einzelaspekte der Bereitstellung, Wandlung, Verteilung, Speicherung und Nutzung von Energie im Zentrum stehen, was den Blick auf das Gesamtsystem verstellt. Dreh- und Angelpunkt der Energieforschung muss jedoch eine **systemische Perspektive** sein. Die technischen und organisatorischen Lösungen für den notwendigen Übergang in eine nachhaltige Energieversorgung lassen sich nur in dem komplexen Umfeld von technischen, sozialen, politischen, kulturellen und wirtschaftlichen Wechselbeziehungen beurteilen und effektiv umsetzen. Im Zeitalter der Globalisierung ist die Energieforschung dabei auf eine integrative und internationale Perspektive angewiesen.

Folgende **Forschungsfelder** können diese Leitlinien umsetzen:

- Eine zukünftige Energieversorgung muss zwingend **Effizienzpotenziale** ausschöpfen. Dies gilt sowohl für bestehende wie auch für zukünftige Systeme entlang der gesamten **Prozesskette** – von der **Bereitstellung** über den **Transport** und die **Speicherung** bis hin zur **Nutzung**. Besondere Chancen liegen in einer vernetzten Energieoptimierung in urbanen Ballungszentren unter Einbeziehung von Stadtplanung, Raumordnung, Gebäudeauslegung, integrierten Mobilitätskonzepten sowie in diesen Systemzusammenhang passenden Technologien wie intelligente Wärme und Stromsteuerung in Haushalten und integrierte Abwärmenutzung (**Energieeffiziente Stadt**). Gleiches gilt für Großenergieverbraucher wie die Stahl- und Zementindustrie.
- Mittelfristig werden weltweit die **fossilen Energieträger** bedeutend bleiben. Da bei ihrer Verbrennung klimarelevantes CO₂ anfällt, ist eine weitgehende **Entkarbonisierung** des Energiesystems eine Schlüsselaufgabe. Wichtig ist dabei, dass alle Optionen der Entkarbonisierung vergleichend untersucht und ihre Nebenwirkungen auf Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft abgeschätzt werden. Optionen wie die Abtrennung und Speicherung des Kohlendioxids (CCS: Carbondioxide Capture and Storage) oder die Nutzung von CO₂-Senken müssen dabei auf ihre technische Machbarkeit, Langzeitsicherheit, Wirtschaftlichkeit, Kompatibilität mit dem restlichen Energieversorgungssystem und der Vereinbarkeit mit den Werten und Präferenzen der Bürgerinnen und Bürger überprüft werden.

ZUSAMMENFASSUNG

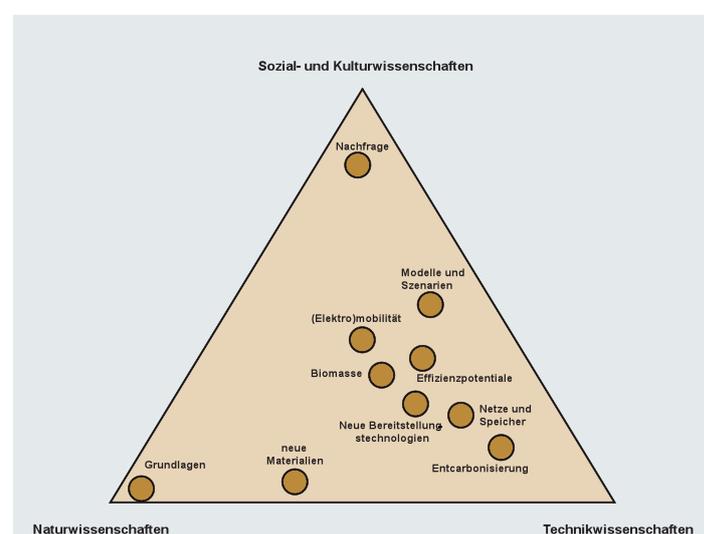
- Bei allem Bemühen um eine effiziente Nutzung der bisher eingesetzten Primärenergieträger werden **innovative Technologien der Bereitstellung** dringend benötigt. Entwicklungslinien mit hohem Forschungsbedarf sind Photovoltaik, Offshore-Windanlagen, grundlastgeeignete Kraftwerke für tiefe Geothermie, solarthermische Großkraftwerke in Südeuropa mit den entsprechenden Konsequenzen für Speicherung und Transportnetze sowie Kernkraftwerke der 4. Generation. Unabhängig davon, ob Deutschland den Pfad der Kernenergienutzung weiter verfolgt, ist die Erforschung neuer nuklearer Technologien vor allem auch im Hinblick auf die Verbesserung der Sicherheit und die Endlagerung eine Zukunftsaufgabe, an der sich Deutschland aus nationalem und weltweitem Interesse wie aus Verantwortung für die globale Energieversorgung beteiligen sollte. Bei der Erschließung nicht-konventioneller Öl- und Gasvorkommen sollte Deutschland auf den Forschungsfeldern mitwirken, auf denen ein wissenschaftlicher oder technologischer Vorsprung vor Ländern besteht, die über die entsprechenden Lagerstätten verfügen. Eine langfristig besonders vielversprechende Option ist die Kernfusion, deren Erforschung in den etablierten internationalen Kooperationen weiter vorangetrieben werden sollte. Begleitend ist die Erforschung der Bedingungen erforderlich, unter denen innovative Lösungen entstehen und sich im Markt etablieren, sowie den Barrieren, die Innovationen im Energiesystem verhindern.
- Die Eignung verschiedener Arten von **Biomasse** für die energetische Nutzung sollte neu überprüft und die Forschung unter Berücksichtigung von Skaleneffekten und unter systemischen Gesichtspunkten (Nahrungsmittel-Konkurrenz, hoher Wasserbedarf, Umweltverträglichkeit, Logistik, Basis des Mobilitätssystems, Biomasse als CO₂-Senke, Bioökonomie) vorangetrieben werden. Hierbei sollte das Potenzial moderner Verfahren der Biomasseverwertung (Verfahren der 2. Generation) durch intensive Forschung eruiert und weiterentwickelt werden.
- Für die in Zukunft stärker diversifizierte Bereitstellungstechnologien müssen verlustarme **Netzkonzepte** entwickelt werden, mit denen auf Schwankungen oder auf Störungen flexibel reagiert werden kann. Hierzu wird eine hoch entwickelte Netzsteuerung mit fortgeschrittenen Speichertechnologien zu kombinieren sein. Die **Speichertechnologien** müssen deutlich weiterentwickelt werden, da sowohl direkte elektrische als auch thermische, mechanische sowie stoffliche Speicher zukünftig wichtige Bausteine einer integrierten Netzstruktur sein werden. Im Sinne der systemischen Perspektive ist besonders auf eine optimale Auswahl und Kopplung von Netz- und Speichertechnologien sowie auf Interaktionen mit den Markt-, Vertrags- und Rechtssystemen der beteiligten Staaten zu achten.
- Bei den verschiedenen Nutzungsformen ist besonders die Forschung im Bereich der Mobilität geboten, da hier der Energieverbrauch weltweit kontinuierlich zunimmt. Zu erwarten ist eine mittelfristige Umstellung des Individualverkehrs auf Elektroantriebe. Im Fokus sollte dabei die Erforschung der Potenziale und der Probleme bei einer Umstellung des Individualverkehrs auf Elektroantriebe stehen. Dabei kommt der **Batterieforschung**, auch jenseits der Lithium-Ionen-Batterie, besondere Bedeutung zu. Grundsätzlich muss eine stärkere **Integration technologischer und gesellschaftlicher Mobilitätskonzepte** untersucht werden, wozu auch die Integration von Elektrofahrzeugen in die Netzinfrastruktur gehört.
- Hohe Temperaturen, verbunden mit aggressiven Medien oder hohen Neutronenflüssen, erfordern **neue Materialien für den Einsatz unter extremen Bedingungen** (z. B. für effizientere thermische, solarthermische oder nukleare Kraftwerke). Basierend auf der Stärke der Material- und Werkstoffforschung in Deutschland sollte dieses FuE-Gebiet in Deutschland schnell und effizient ausgebaut werden.

- Unabhängig von der industriellen Umsetzung von Technologien besteht aber auch die Notwendigkeit, das **grundlegende Verständnis von energieübertragenden Prozessen** auf molekularer Ebene zu verbessern, insbesondere von Mehrelektronen-Transferprozessen, auch über Phasengrenzen hinweg. Ein enges Zusammenspiel von Chemie, Physik und Biologie kann hier die Grundlage für die Optimierung bestehender Verfahren und für die Entwicklung ganz neuer Technologien bilden.
- Entscheidungen in Energiepolitik und Energieforschung erfolgen vor dem Hintergrund von Annahmen über zukünftige Entwicklungen („**Energiezukünfte**“). Diese Annahmen betreffen z.B. die Verfügbarkeit und Sicherung der wirtschaftlichen Versorgung angesichts geopolitischer Verschiebungen, die Wirksamkeit von Anreizsystemen und die Abschätzung von Kosten und Folgen im gesamten Zyklus (Vollkostenrechnung), die Reichweite von internationalen Vereinbarungen oder die Akzeptanz von Technologien oder Lebensstiländerungen. Zur Ausgestaltung des notwendigen Übergangs in eine nachhaltige Energieversorgung benötigt die Energiepolitik deshalb **integrierte Modelle und Szenarien**, die in der Lage sind, verschiedene Handlungsoptionen, deren voraussichtliche Vor- und Nachteile sowie deren Umsetzungschancen zuverlässig abzuschätzen – und zwar mit allen Unsicherheiten, die damit verbunden sind. Die Forschungsaktivitäten sind vor allem auf die Interaktionen zwischen den Bereichen Technologieentwicklung, Diffusion von Innovationen, rechtliche und ethische Bewertungen, staatliche Regulierung sowie sozio-politische Anreize und Barrieren auszurichten. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die globale Situation und die Möglichkeiten internationaler Kooperation gelegt werden.
- Die bisher erreichten Einsparungen im Energieverbrauch durch Verbesserungen der Effizienz wurden weltweit immer wieder durch den Mehrkonsum von Energiedienstleistungen in nahezu allen Ländern überkompensiert. Dem Thema **Nachfrage nach Energiedienstleistungen** sollte künftig wesentlich mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der systematischen und praxisorientierten Instrumentenforschung. Bis heute ist weitgehend ungeklärt, welche **ökonomischen, rechtlichen und politischen Steuerungsinstrumente** die energie- und klimapolitischen Ziele effektiv, effizient, rechts- und sozialverträglich erfüllen helfen und wie sich diese in die **globalen Rechts- und Governance-Strukturen** wirksam einbinden lassen. Dies erfordert die Entwicklung völlig neuer integrativer Forschungsansätze. Vor allem sind sogenannte **Second Best-Strategien** zu erforschen, die dann greifen, wenn beispielsweise ein weltweit geltendes klimapolitisches Abkommen nicht zustande kommt. Die Energiepolitik braucht mehr Wissen darüber, in welcher Weise psychologische, kulturelle und institutionelle Kontextbedingungen die Nachfrage nach Energiedienstleistungen und die Akzeptanz von Energietechnologien und energiepolitischen Maßnahmen beeinflussen.

Das Zusammenspiel aller angesprochenen – und in Abbildung 1 schematisch dargestellten – Forschungsfelder lässt sich nur durch eine **systemische Herangehensweise** und unter Einbeziehung von Expertise aus unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen adäquat bearbeiten.

Energieforschung wird in Deutschland an Universitäten, Großforschungszentren, in Max-Planck- und Fraunhofer-Instituten und in der Industrie durchge-

Abb. 1: Handlungsfelder der Energieforschung



ZUSAMMENFASSUNG

führt. Eine solche Pluralität an energiebezogenen Forschungseinrichtungen im Grundlagen- wie Anwendungsbereich ist grundsätzlich positiv zu beurteilen. Um die notwendigen Forschungsanstrengungen in Deutschland effizient umzusetzen, ist aber eine geeignete Koordinationsstruktur zu schaffen, sonst wird sich die erforderliche systemische Sichtweise nicht durchsetzen.

Für eine kontinuierliche, interdisziplinäre und systematische Arbeit auf dem Feld der Energieforschung sind in Deutschland neue Forschungsstrukturen nötig, die außeruniversitäre und universitäre Kompetenzzentren zusammenführen und eine Basis für Kooperationen mit der Industrie bilden. Ob hierzu auch die Bildung eines oder mehrerer großer Forschungszentren nötig und möglich ist, sollen weiterführende konzeptionelle Planungen ergeben. Hierbei sollten alle Aspekte der Energieforschung, von den Technikwissenschaften über die Naturwissenschaften bis hin zu den Sozial- und Geisteswissenschaften, vereint werden. In derartigen Strukturen müsste es möglich sein, Technologien durch Forschung und Entwicklung bis zur Marktreife zu betreuen. Die Finanzierung müsste langfristig gesichert sein. Wegen der Bedeutung der wissenschaftlichen Ausbildung des Nachwuchses muss Wert auf eine enge Anbindung an universitäre Forschung und Lehre gelegt werden.

Den Universitäten kommt in einer zukünftigen Struktur eine besondere Bedeutung zu, da sie in vielen Bereichen der Energieforschung Spitzenleistungen erbringen sowie den **wissenschaftlichen Nachwuchs für die Energieforschung** ausbilden. Um an Universitäten den systemischen Charakter der Forschung zu stärken, sind einerseits themenspezifische Verbünde und andererseits interdisziplinäre **Exzellenz-Cluster oder Kompetenzzentren** dringend zu empfehlen. Auf diese Weise können bestimmte Problembereiche der Energieversorgung und der Energienachfrage interdisziplinär und vernetzt erforscht werden. In der Lehre fehlt es an fundiert, breit und fachübergreifend ausgebildetem Nachwuchs im Bereich Energie. Hier sollten vor dem Hintergrund des Querschnittcharakters des Themas Energie enge Verknüpfungen zwischen Disziplinen wie Maschinenbau, Material- und Werkstoffwissenschaften, Elektrotechnik, Chemie, Physik, Biologie, Volkswirtschaftslehre und Sozialwissenschaften hergestellt werden. Entsprechende Studiengänge sollten etabliert werden. Promotionen und Promotionskollegs mit einem solchen übergreifenden Forschungsansatz sind zur Nachwuchssicherung empfehlenswert.

Hinsichtlich der notwendigen Kooperation zwischen Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und der Industrie ist die Projektförderung in ihrer derzeitigen Struktur für die Energieforschung meist noch zu diskontinuierlich und für Forscherinnen und Forscher an den Hochschulen oft wissenschaftlich nicht attraktiv genug ausgestaltet. Zur Verbesserung dieser Situation sollte die Förderung verstärkt auf die genannten Verbünde, Cluster und Zentren konzentriert werden, um den bestmöglichen Wirkungsgrad der Fördermittel zu erreichen. Dennoch sollte immer auch Raum für innovative Einzelansätze bleiben.

Die Förderung der Energieforschung in Deutschland hat in den letzten Jahren schon zunehmend interdisziplinäre Aspekte und eine systemische Betrachtung einbezogen. Dennoch ist die systemische Sicht in der Energieforschung noch zu wenig verbreitet, was sich nicht zuletzt auch in einer Fragmentierung der Zuständigkeiten in der Forschungsförderung niederschlägt. Effiziente Energieforschung bedarf aber **klarer Zuständigkeiten**. Daher sollte ein mit Richtlinienkompetenz ausgestattetes gemeinsames Koordinierungsgremium „Energieforschung“ (mit einer Struktur wie die BW+ Initiative des Landes Baden-Württemberg) etabliert werden, in dem neben den Ressorts auch unabhängige Wissenschaftler vertreten sein sollten. Ein solches Gremium würde die vielfach zu einzelnen Förderprogrammen existierenden Beiräte ablösen. Alternativ dazu könnte die Zuständigkeit für die Energieforschung sogar in einem Ressort zusammengeführt werden. Einem solchen Ministerium sollte ein wissenschaftlicher Beirat zur Seite gestellt werden. Im Aufbau eng gekoppelter und vernetzter Strukturen liegt eine der größten Chancen für eine effiziente, zielgerichtete und nachhaltige Energieforschungspolitik.

I Einleitung

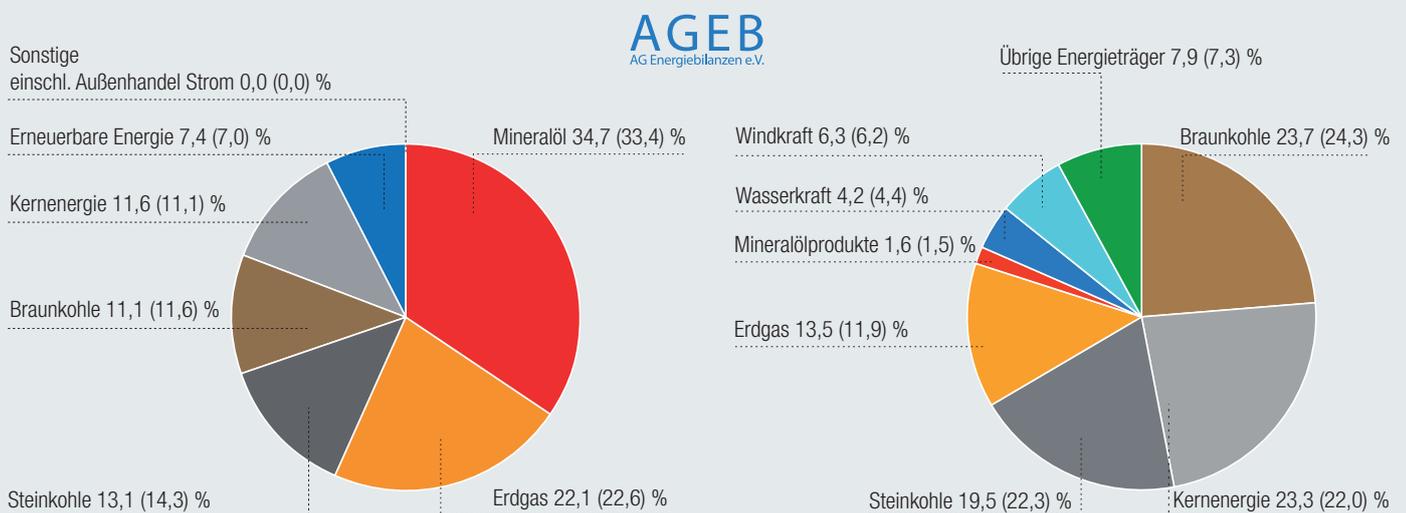
Ausgangssituation

Innovative Forschung ist Deutschlands wichtigste Ressource und Basis für die Entwicklung realistischer Optionen zur Gestaltung der künftigen **Energieversorgung** im Spannungsfeld von **Klima-** und **Umweltschutz** auf der einen und **Versorgungssicherheit** zu **vertretbaren Kosten** auf der anderen Seite. Damit dies gelingt, ist eine **systemische Sichtweise unabdingbar**. Diese erfordert eine enge und vernetzte Zusammenarbeit der Wissenschaften über den gesamten Zyklus der Energieumwandlung von der Bereitstellung über die Verteilung bis zur Nutzung der Energie. Da die politischen, sozioökonomischen, ökologischen und klimatischen Randbedingungen ebenso wie der wissenschaftlich-technische Fortschritt für die nächsten 20, 50 oder gar 100 Jahre kaum vorhersehbar sind, muss die Energieforschung absehbare Entwicklungen antizipieren und auf überraschende Änderungen der Bedingungen flexibel reagieren. Diese Anforderung bedingt, dass Wissenschaft auch über längere Zeiträume unabhängig die Aspekte bearbeiten kann, die nicht im Fokus der tagespolitischen Aufmerksamkeit liegen.

Die Vereinbarkeit von Energieversorgungs- und Klimaschutzziele gehört zu den zentralen Herausforderungen der Gegenwart. Auf dem Kopenhagen-Gipfel im Dezember 2009 dürften die Klimaschutzziele eine weitere Verschärfung erfahren. Zunehmend tritt angesichts der globalen Entwicklung auf den Weltenergiemärkten auch das Thema **Verteilungsgerechtigkeit** auf die politische Agenda. Konflikte zwischen diesen Zielen werden nicht nur im Hinblick auf unterschiedliche Entwicklungen in den OECD-Staaten und den Schwellenländern oder bei einem zwischenstaatlichen Vergleich der Industrieländer deutlich, sondern zeigen sich bereits in den Stufen der Energieversorgung entlang der Prozesskette Bereitstellung – Verteilung – Nutzung.

Die Primärenergieversorgung (Abbildung 2) in Deutschland wird heute zu etwa 80 % durch fossile Energieträger gedeckt. Auch in den nächsten zwei Jahrzehnten werden Kohle, Gas und Öl die mit Abstand wichtigsten Energieträger sein. Die Stromproduktion (Abbildung 3) in Deutschland wird gegenwärtig zu 60 % durch Kohle und Gas gesichert, zu 22 % aus Kernenergie und zu 14 %

Abb. 2 und 3: Primärenergieverbrauch (links) und Stromproduktion (rechts) in Deutschland in den Jahren 2007 (in Klammern) bzw. 2008 (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.)



EINLEITUNG

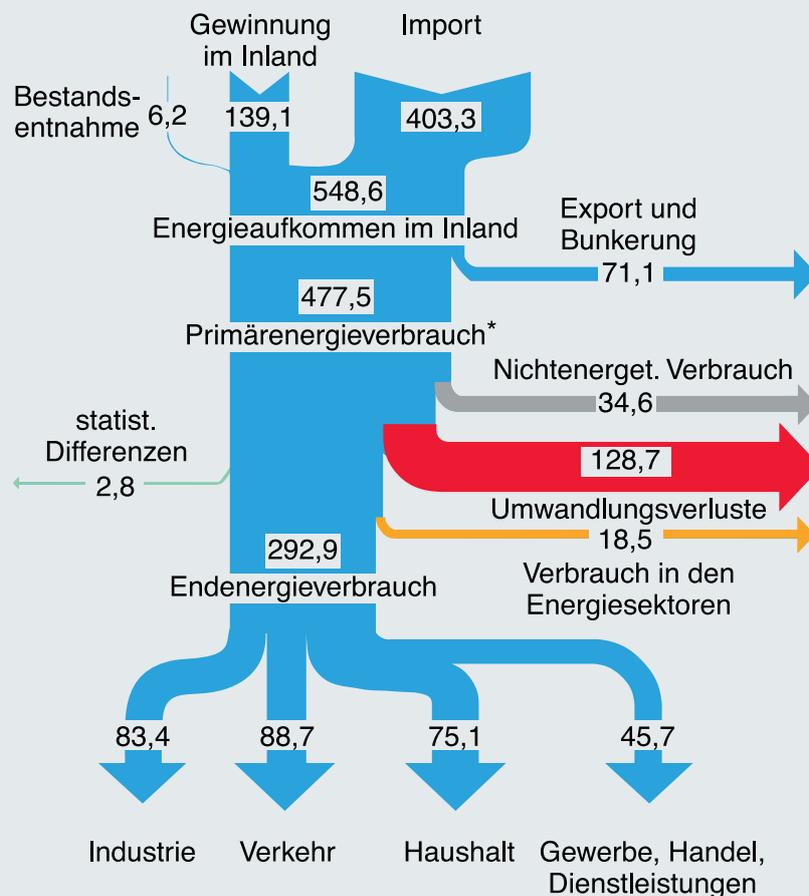
aus regenerativen Energiequellen. Gleichzeitig werden die 2020-Klimaschutzziele mit hohem Druck verfolgt.

Dies unterstreicht die Notwendigkeit, mittel- und langfristig nach Wegen zu suchen, die fossilen Energieträger sukzessive zu ersetzen und kurzfristig Maßnahmen der Einsparung und Effizienzsteigerung vorzunehmen. Diese Ansätze müssen in allen Verbrauchssektoren verfolgt werden, weil sie alle in etwa dem gleichen Ausmaß Energiedienstleistungen in Anspruch nehmen. Insbesondere bei der Umwandlung von Energie treten beträchtliche Verluste auf (Abbildung 4); hier sind Effizienzstei-

gerungen besonders wichtig. Einige der Aktivitäten in der Energieforschung sind – unabhängig von den Ausgangsbedingungen, energiepolitischen Weichenstellungen und der sozioökonomischen Entwicklung – von hoher Bedeutung für zukünftige Energiesysteme. Diese Maßnahmen sollten in jedem Falle bei der Entwicklung von Energieforschungskonzepten berücksichtigt werden. Sie sind unter dem Stichwort No Regret-Strategien im anschließenden Kapitel näher dargestellt.

Der Übergang zu einem neuen Energiesystem wird nicht frei von Zielkonflikten sein. Die Energiedichte regenerativer Energiequellen ist überwie-

Abb. 4: Energieflussdiagramm 2007 für die Bundesrepublik Deutschland. Zahlenangaben in Millionen Tonnen Steinkohleeinheiten (SKE) (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.)



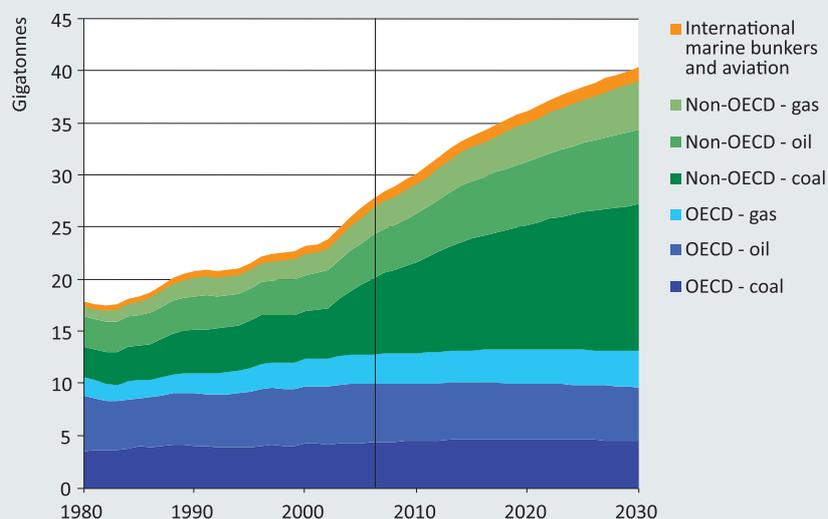
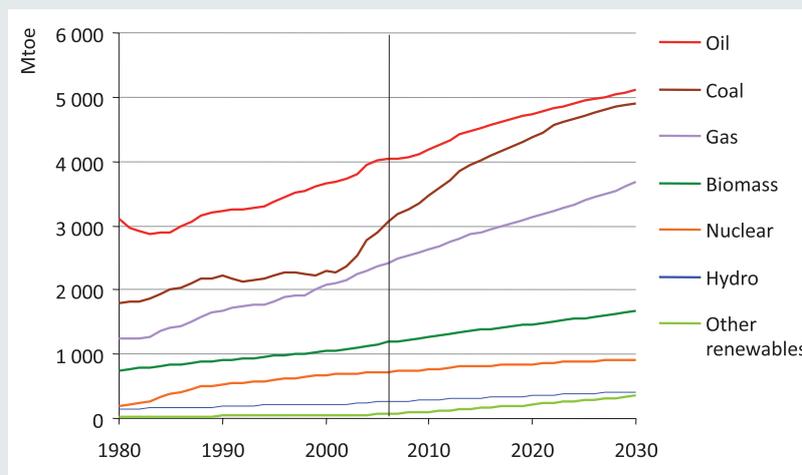
*Der Anteil der erneuerbaren Energieträger liegt bei 7,2%.
Alle Zahlen vorläufig/geschätzt.
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 08/2008

gend gering. Ihre Nutzung erfordert daher mehr Material, Flächen und Aufwand für die Bereitstellung der gewünschten Energiedienstleistung.

Im Bereich der Mobilität sind flüssige Brennstoffe mit hoher Energiespeicherdichte im Hinblick auf Reichweite, Zuverlässigkeit, Komfort und Kosten im Vorteil, auch wenn Alternativen (Stichwort Elektromobilität) derzeit intensiv in Betracht gezogen werden (siehe folgendes Kapitel zu No Regret-Strategien). Die Alternative Kernenergie erscheint in vielen Ländern wieder attraktiv, ist aber vor allem in Deutschland gesellschaftlich umstritten – und die Frage, ob es gelingen kann, die nuklearen

Abfälle für mehrere zehntausend Jahre sicher gegen die Biosphäre abzusichern, wird kontrovers diskutiert. Die Fusionsforschung verspricht eine günstige Alternative in der Zukunft, die Einlösung dieses Versprechens ist jedoch noch nicht gesichert. Schließlich sind auch Verbesserungen der Effizienz in der Umwandlung und Nutzung der Energie zum Teil mit hohen Investitionskosten verbunden, die sich nach dem heutigen Energiekostenniveau teilweise nicht oder erst nach langen Zeiträumen rechnen. Gleichwohl besteht hier ein sehr wirkungsvoller Hebel, der genutzt werden muss.

Abb. 5 und 6: Projektionen der Zunahme des Primärenergiebedarfs und der energiequellenbezogenen CO₂-Emissionen im Referenzszenario des World Energy Outlook 2008 (Quelle: IEA 2008).



EINLEITUNG

Die globale Nachfrage nach Energie ist ungebrochen. Die Projektion des jährlichen Anstiegs des Primärenergiebedarfs im Referenzszenario des World Energy Outlook 2008 beläuft sich auf 1,6 % und der vorhergesagte Anstieg des CO₂-Ausstoßes liegt in der gleichen Größenordnung, vor allem in den Nicht-OECD-Staaten (Abbildung 5 und 6).

Diese Zunahme des Energieverbrauchs kann in den meisten OECD-Staaten durch Effizienzverbesserungen ausgeglichen werden, so dass sich der Verbrauch an Primärenergie pro Einheit Energiedienstleistung verringert, zum Teil allerdings schon jetzt zu hohen Kosten. Auf Dauer wird sich eine ständige Steigerung der Nachfrage wegen des abnehmenden Grenzertrages der Effizienz-erhöhung nicht mehr ohne erheblichen Aufwand kompensieren lassen. In den Nicht-OECD-Staaten eröffnen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ein enormes Energieeinsparpotenzial, das bislang jedoch viel zu wenig genutzt wird.

Zudem sind Energieprobleme nicht mehr auf die nationale Ebene begrenzt, geschweige denn im nationalen Rahmen zu lösen. Antworten auf die Herausforderungen der zukünftigen Energieversorgung sind im Zeitalter der Globalisierung auf eine internationale, wenn nicht gar globale Perspektive angewiesen. Dies betrifft nahezu alle relevanten Energiethemen – angefangen bei der Sicherheit und Transportabhängigkeit, über die wechselseitige Beziehung von regionalen, nationalen, europäischen und internationalen Steuerungsinstrumenten der Energiepolitik und zur Verteilung von Chancen und Risiken, bis hin zur Versorgungssicherheit für die jeweils betroffenen Regionen (Stichwort: Energiearmut). Von internationalen Normen und Konventionen, Grundentscheidungen (speziell im Umweltrecht) und von Regulierungsstrategien der einzelnen Staaten und Staatengemeinschaften hängt maßgeblich ab, ob die als richtig anerkannten Maßnahmen auch weltweit umgesetzt werden.

Die internationale Wirksamkeit von Steuerungsprozessen zur Erreichung von Zielen wie Klimaschutz, Effizienzerhöhung und weltweiter Versorgungssicherheit ist bislang noch zu wenig im Fokus der Energieforschung in Deutschland. Ge-

rade im Bereich der Klimapolitik ist es unabdingbar, ein global wirksames und von allen Staaten mitgetragenes Regime einzurichten, das die bekannten Probleme bei der Nutzung von Gemeinschaftsgütern (Allmende-Dilemma) überwinden hilft. Für diesen Zweck sind zum einen global wirksame Instrumente zu entwickeln, zum anderen geeignete Steuerungsformen aus der Erforschung von internationalen Institutionen, Politiken und Mehrebenensystemen abzuleiten. Nicht zuletzt stärkt eine dezidiert internationale Ausrichtung die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Energieforschung. So ist zum Beispiel der internationale Rechtsvergleich eine wesentliche Voraussetzung für eine Übertragung des deutschen Energierechts oder Teile daraus in internationales Recht (inkl. Benchmarking).

Unabhängig davon, ob man die Energiesituation aus einer globalen Perspektive oder aus der Perspektive Europas oder Deutschlands betrachtet: Es schälen sich einige robuste Ziele heraus, die bei energiepolitischen Entscheidungen durchweg und gleichzeitig angestrebt werden müssen. Dazu gehören vor allem:

- die langfristige Sicherung von Energiedienstleistungen für eine beständig zunehmende Weltbevölkerung, die durch die absehbare Knappheit der heute dominierenden Energieträger gefährdet ist,
- die Bereitstellung von Energie zu vernünftigen finanziellen Konditionen als Basis für den Erhalt von Wohlstand und Wettbewerbsfähigkeit in Ländern wie Deutschland und für Aufbau und Entwicklung von lebenswerten Bedingungen in den sich entwickelnden Ländern,
- der Schutz von Klima und Umwelt,
- die Sicherstellung von Verteilungsgerechtigkeit in der Versorgung mit Energiedienstleistungen.

Diese Ziele stoßen zwangsläufig auf Randbedingungen, die ihre gleichzeitige Erreichung schwierig machen: Ungeachtet vieler Bemühungen seit den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts, den



Abb. 7: Integrierte Sichtweise einer zukunftsweisenden Energieforschung.

Anteil fossiler Energieträger stetig zu senken, ist er weltweit angestiegen. Trotz großer Erfolge bei der Verbesserung der Effizienz übertraf der Anstieg der Nachfrage nach Energiedienstleistungen stets den Gewinn durch Effizienzsteigerung. Und trotz der weltweiten Einsicht, dass aus Gründen des Klima- und Ressourcenschutzes global wirksame Programme und Instrumente für den Umbau der Energieversorgung unerlässlich sind, fehlt es bis heute an einem weltweiten, alle Länder verpflichtenden Abkommen, um eben dieses Ziel zu erreichen.

Der systemische Ansatz der Energieforschung als zentrales Element

In dieser Situation kommt der Energieforschung zentrale Bedeutung zu. Diese ist in Deutschland gegenwärtig durch eine nur schwach ausgeprägte Kongruenz von Zielsetzung und Handeln zwischen den einzelnen Bundesministerien geprägt. Darüber hinaus trägt die föderale Struktur der Bundesrepublik Deutschland dazu bei, dass eine klare, in sich konsistente und zielorientierte Ausrichtung der Energiepolitik nur in Ansätzen zu erkennen ist.

Es wäre allerdings falsch, diesen Eindruck der Inkonsistenz allein der Politik anzulasten. Vielmehr findet sich auch in der Wissenschafts- und Forschungslandschaft Deutschlands eine fragmentierte und wenig koordinierte Sicht des Themas Energie. Eine **integrierende, prozesskettenorientierte und systemische Sichtweise** ist demgegenüber jedoch eine unabdingbare Vor-

aussetzung für eine entsprechende Strukturierung der anstehenden Forschungsfragen.

Energiedienstleistungen werden über die Kette Bereitstellung-Übertragung-Nutzung vom Erzeuger zum Verbraucher transportiert. Traditionell setzt die Forschung an einzelnen Technologiekomponenten dieser Kette an, bestenfalls werden Zusammenhänge innerhalb der Kette berücksichtigt. Dieser Ansatz greift aber zu kurz. Er verkennt, dass die Effizienzerhöhung entlang der Kette nur dann optimal erreicht werden kann, wenn gleichzeitig andere Technologien in die Forschungsaktivitäten eingebunden werden. Weiterhin ist eine technologische Entwicklung immer in ein Umfeld an sozioökonomischen Zusammenhängen eingebunden, das in der Forschung an Energietechnologien ebenfalls berücksichtigt werden muss (Abbildung 7). Rein technologische Forschungsansätze werden in der Mehrzahl zum Scheitern verurteilt sein, wenn etwa die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, die Nachfragesteuerung oder die Akzeptanz einer Technologie nicht mit in die Systementwicklung einbezogen werden. Zudem ist eine enge Verknüpfung zwischen Technologieentwicklern im akademischen und privatwirtschaftlichen Bereich und Technologienutzern zu berücksichtigen.

Schließlich darf gerade bei der Einführung neuer Energietechnologien die Frage der Rohstoffverfügbarkeit nicht vernachlässigt werden. Besonders in den Massenmärkten können knappe Rohstoffe, wie etwa Indium, Lithium oder Gallium, von hoher strategischer Bedeutung sein. Kernfragen

EINLEITUNG

sind dabei sowohl die gesamte Verfügbarkeit als auch die geographische Verteilung von Lagerstätten, die im ungünstigen Falle das Risiko politischer Erpressbarkeit mit sich bringt.

Das heute durch Natur- und Technikwissenschaften geprägte Bild der Energieforschung bedarf aus dem systemischen Blickwinkel einer engen Verknüpfung mit ökonomischen, ökologischen, rechtlichen und gesellschaftswissenschaftlichen Entwicklungen. Es ist daher ein Kernanliegen der drei an diesem Konzept beteiligten Akademien, mit diesem Papier ein integriertes Konzept vorzulegen, das Natur-, Technik- sowie Geistes-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften gleichermaßen einbezieht. Wenn man die Anbieter und die Nutzer von Technologien im Fokus hat, sind Fragen der Wirtschaftlichkeit, der institutionellen Steuerung und der Akzeptanz zentral für die Innovations- und Wandlungsfähigkeit einer Gesellschaft.

Auch in der Lehre, die heute – trotz zahlreicher Versuche – immer noch stark sektoral geprägt ist, besteht erheblicher Reformbedarf, um die systemische Sicht auf die Energieforschung zu verankern. Derzeit wird der wissenschaftliche Nachwuchs nur eingeschränkt auf die anstehenden Herausforderungen vorbereitet. Neben der Ausstattung mit unverzichtbarem Spezialwissen muss die nächste Generation von Wissenschaftlern an transdisziplinäre und systemische Sichtweisen herangeführt werden. Nicht nur im wissenschaftlichen, sondern auch im technischen und handwerklichen Bereich ist eine gezielte Nachwuchsförderung unverzichtbar, wenn Deutschland mittel- und langfristig ein Produktionsstandort im Bereich der Hochtechnologie bleiben soll.

Notwendige Prämissen der Energieforschung

Aus der genannten Aufzählung der Herausforderungen und Ziele lassen sich zwei Schlüsse für die grundlegende Beschaffenheit einer zukünftigen Energieforschung ziehen: Zum ersten ist eine erfolgversprechende Lösung der Energieprobleme ohne die Erweiterung der Wissensbasis sowohl im technologischen, naturwissenschaftlichen als auch im gesellschaftswissenschaftlichen Bereich

nicht denkbar. Dementsprechend muss der **Stellenwert der Energieforschung in Deutschland erheblich angehoben** werden.

Zum zweiten wird die Forschung nur dann wirksame Lösungsvorschläge hervorbringen können, wenn sie nicht disziplinär und abgeschottet Teilaspekte des jeweiligen Problems angeht, sondern – wo immer sinnvoll – von vornherein als interdisziplinäre oder sogar transdisziplinäre Forschung angelegt ist.

Um die Herausforderungen bei der Transformation unseres Energiesystems effektiv, effizient und gerecht angehen zu können, benötigt die Gesellschaft Wissen auf vier Ebenen:

- **Grundlagenwissen:** Hier geht es um die Entwicklung neuer Ideen und um die Erforschung grundlegender Zusammenhänge, innovativer Materialien und alternativer Verfahren. Detaillierte Kenntnisse naturwissenschaftlicher Vorgänge und technischer Prozesse ermöglichen eine Optimierung bestehender Energieumwandlungs- und Energienutzungstechniken und eine Entdeckung neuer und günstiger Wege.
- **Orientierungswissen:** Hier geht es um Forschung, die für die wichtigen Entscheidungen in der Energiepolitik und Energiewirtschaft reflektives Wissen zur Verfügung stellt. Sie trägt dazu bei, Zielkonflikte zu identifizieren, die unterschiedlichen Perspektiven der Akteure konstruktiv (und partizipativ) einzubinden und in Abwägung von Wünschbarem und Machbarem tragfähige Strategien des Übergangs zu entwerfen.
- **Systemwissen:** Hier geht es um Forschung, welche die vernetzten Ursachen und Wirkungen menschlicher Interventionen in Natur und Technik im Fokus hat. Am Beispiel der Biomassenutzung ist deutlich zu erkennen, dass die anfängliche Euphorie in Bezug auf diese Energiequelle viele Implikationen ihrer verstärkten Nutzung, von der Gefährdung der Biodiversität bis hin zum starken Anstieg eines Teils der Lebensmittelpreise, nicht hin-

reichend berücksichtigt hatte. Wissen, das Entscheidungsträgern hilft, die erwünschten Leistungen zu erbringen, ist ebenso notwendig wie Wissen um nicht beabsichtigte Nebenwirkungen, Risiken wie Chancen.

- **Transformationswissen:** Hier geht es um die Umsetzung als sinnvoll erkannter Ziele in die Realität. In erster Linie handelt es sich dabei um angewandte Forschung und Entwicklung, vor allem im naturwissenschaftlichen und technischen Bereich, mit dem Ziel, neue Primärenergieträger zu erschließen, die Effizienz der Umwandlung und Nutzung zu verbessern, die Anforderungen an die Infrastruktur festzulegen und die systemischen Voraussetzungen für neue Energiepfade zu erkunden. In zweiter Linie geht es aber auch um die politische und soziale Umsetzung: Vieles, was technisch und ökonomisch sinnvoll sein mag, wird dennoch nicht Realität, sei es, weil falsche oder unwirksame Instrumente eingesetzt werden, sei es, weil eine Diskrepanz zwischen der Rationalität der einzelnen Akteure und dem Gemeinwohl aller Akteure besteht (Allmende-Problem), oder sei es, weil bestimmte Maßnahmen oder Technologien nicht akzeptiert werden. Hier sind die Kulturwissenschaften gefragt.

Diese vier miteinander verwobenen Ebenen des Wissens machen einmal mehr die systemische Natur der Energieforschung deutlich. Ein Konzept, das nur eine oder wenige dieser Dimensionen adressiert, wird zu kurz greifen und dadurch Lösungen hervorbringen, die nur bis zu einem gewissen Grade tragfähig sind. Das folgende Energieforschungskonzept, das die Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften gemeinsam erstellt haben, trägt der systemischen Natur des Problems Rechnung und versucht, eine integrierende Sichtweise zu vermitteln, ohne auf klare Empfehlungen bezüglich der Forschung an konkreten Problemen zu verzichten.

Aufbau dieses Energieforschungskonzepts

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Bereiche der Energieforschung beschrieben, die in jedem Falle prioritär angegangen werden sollen, entweder weil sie von **überragender Bedeutung** sind oder weil sie – unabhängig von Veränderungen der Randbedingungen – in **jeder wahrscheinlichen Energiezukunft entscheidende Komponenten** bilden werden. Sie sind hier als „**No Regret-Maßnahmen**“ bezeichnet.

Das dritte Kapitel entwickelt anschließend spezifische Forschungsmodule (regenerative Energiequellen, kohlenstoffbasierte Energieträger, Kernenergie), die auf der Basis eines forcierten Ausbaus einer Klasse von Bereitstellungstechnologien Optionen im Sinne von Wenn-Dann-Beziehungen beschreiben. Durch die Diskussion der drei Module werden über die No Regret-Maßnahmen hinausgehende Handlungsmöglichkeiten unter variablen Ausgangsbedingungen aufgezeigt und deren Vor- und Nachteile für ihre notwendige politische Bewertung charakterisiert. In Verbindung mit dieser Bewertung stellen sich Fragen wie:

- Was wäre zu tun, wenn der Klimawandel noch dramatischer ausfallen würde als jetzt berechnet?
- Was müsste man erforschen, wenn alle Bemühungen um ein internationales Abkommen scheitern oder in ein Scheinabkommen münden (Second Best-Szenarien)?
- Was würde es für die Forschung bedeuten, wenn sich die internationale Gemeinschaft auf einen forcierten Ausbau der Kernenergie einigen würde?
- Welche Art von Forschung ist prioritär, wenn trotz aller Bemühungen die fossilen Energieträger weiterhin die Energielandschaft dominieren?

Naturgemäß können hier nicht alle denkbaren Wenn-Dann-Beziehungen berücksichtigt werden. Dennoch erscheint es sinnvoll, drei Module

EINLEITUNG

aufzuzeigen, mit denen durch Kombination von Elementen in unterschiedlicher Art und Weise auf eine große Bandbreite veränderter Rahmenbedingungen reagiert werden könnte.

Der Zweck dieser Extremszenarien (regenerativ, fossil, nuklear) besteht darin, den möglichen Handlungsspielraum in den jeweiligen Feldern bis hin zu extremen Anforderungen abzudecken und die damit verbundenen Forschungsanforderungen möglichst genau herauszuarbeiten. Es ist dann die Aufgabe der Politik, festzulegen, wie viel davon umgesetzt werden soll, um über die ohnehin notwendigen Maßnahmen (No Regret-) hinaus flexibel auf Änderungen der Rahmenbedingungen und Annahmen reagieren zu können. Nochmals sei an dieser Stelle allerdings betont, dass **Energieforschung wesentlich breiter angelegt sein**

muss als die jeweilige Energiepolitik, um möglichst viele Optionen für die Zukunft offenzuhalten.

Im vierten Kapitel werden wissenschaftliche Querschnittsthemen beschrieben, die bearbeitet werden müssen, um den Übergang zu einer Gesellschaft mit langfristig gesicherter, nachhaltiger Energiewirtschaft vorzubereiten. Vor dem Hintergrund der Ausführungen der Kernkapitel zwei, drei und vier werden in Kapitel fünf strukturelle Empfehlungen zu Fragen der Infrastruktur, der Forschungsförderung, der Forschungsorganisation und der Nachwuchsförderung gegeben.

Es schließt sich ein Ausblick als sechstes Kapitel an.

II No Regret-Forschungsschwerpunkte

Einleitung

Eine Reihe von Energieforschungsfeldern muss unabhängig von den gewählten Technologie-schwerpunkten in jedem Falle – und im Wortsinn „ohne Bedauern“ – aus den weiter oben skizzierten Gründen mit höchster Priorität verfolgt werden.

Effizienzmaßnahmen bergen ein großes Potenzial und sind durch einen hohen Grad an Kompatibilität gekennzeichnet, da sie für alle Bereitstellungsoptionen gelten bzw. neue ermöglichen. Bereits heute zielt ein weiter Bereich der Energieforschung auf Optimierung und Effizienzsteigerung. Sie reicht von der Wirkungsgradsteigerung bei der Wandlung von Primärenergie in nutzbare Energie – z. B. bei Gasturbinen oder photovoltaischen Elementen – über die Absenkung von Verteilungsverlusten bei der Übertragung von elektrischer Energie durch Etablierung von Hochspannungsgleichstromleitungen für längere Transportentfernungen bis hin zur Anwendung durch Nutzer in Industrie und privaten Haushalten oder zu der energieeffizienten Sanierung von Gebäuden.

Die Energienutzung wird sich in Zukunft zunehmend in Richtung der elektrischen Energie verschieben, da die meisten Bereitstellungstechnologien, die fossile Energiequellen ersetzen können, primär elektrische Energie liefern und weitere Umwandlungen grundsätzlich mit Verlusten verbunden sind. Die elektrische Energie kann insofern als höchstwertige Form betrachtet werden, als sie in ihrer Anwendung die größte Flexibilität bietet. Aus ihr kann ohne großen Aufwand und mit hoher Effektivität jede andere Energieform bereitgestellt werden (Wärme, Licht, Bewegung usw.). Man spricht deshalb bereits heute vom Ziel einer All Electrical Society, einer weitgehend elektrifizierten Gesellschaft – ein Ziel, das auch für Deutschland von Relevanz ist. Als Konsequenz ergibt sich daraus zwangsläufig, dass ein zukünftiges Energiesystem sich auf elektrische Netze, Speicher und Umwandlungstechnologien stützen wird, mit de-

ren Hilfe aus elektrischer Energie unmittelbar die jeweils benötigte Nutzenergie gewonnen wird.

Die energieeffiziente Stadt als integrativer Forschungsansatz

Die Hälfte der Weltbevölkerung lebt in Städten, und dieser Anteil wird in den nächsten Jahrzehnten weiter stark wachsen. Es ist daher von zentraler Bedeutung, Visionen einer nachhaltigen Stadtinfrastruktur zu entwickeln, welche helfen, die Bevölkerungskonzentration zu einer Steigerung der Energieeffizienz zu nutzen. Für die Forschung stellen sich dazu zahlreiche Fragen: Wie kann die Raumanordnung nachhaltiger Städte aussehen und was ist ihre optimale Größe? Welchen Beitrag können sie zur Verringerung des Energieverbrauchs und des Treibhausgasausstoßes beitragen? Auf welche Weise kann dies geschehen? Welche Technologien benötigen wir dazu? In welchem Maße können Städte als Innovationszentren und Laboratorien einer nachhaltigen Zukunft fungieren?

Wenn diese Fragen beantwortet werden sollen, treten zwei Sektoren besonders in den Vorder-



NO REGRET-FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

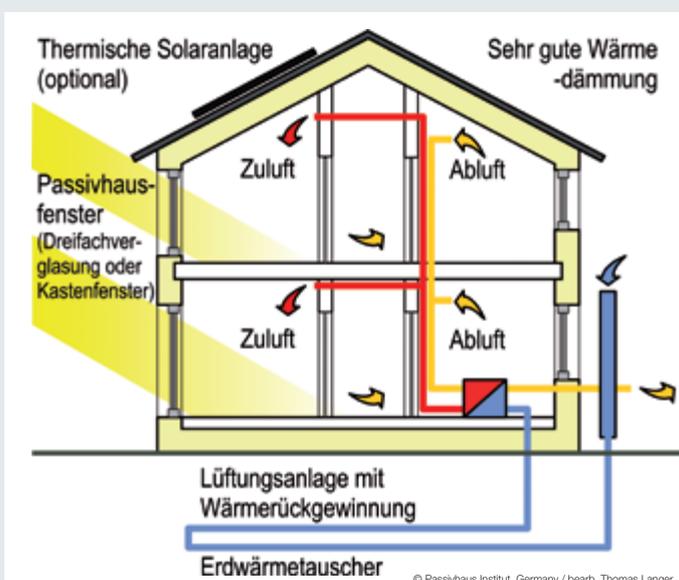
grund: Gebäude und Verkehr. Mit 33,5 % hat der Gebäudebereich für die Energiedienstleistungen Raumwärme, Warmwasser und Beleuchtung den größten einzelnen Anteil am Endenergieverbrauch in Deutschland. Wenn man bedenkt, dass 80 % aller Haushalte nicht auf dem neuesten Stand der Technik sind, besteht offensichtlich ein hohes Energiesparpotenzial. Der gesamte Verkehrssektor benötigt einen ähnlichen Anteil der Endenergie wie der private Sektor (siehe oben, Abbildung 4); allerdings liegt in diesem Bereich das rein technologische Sparpotenzial vermutlich niedriger. Verbunden mit diesen beiden Sektoren, die für die Erhöhung der Energieeffizienz von Städten besonders wichtig sind, müssen auch die Versorgungsnetze und – wo nötig – Speicher so weiterentwickelt werden, dass sie neue Angebots- und Nachfragestrukturen bedienen können. Diese drei Forschungsthemen entfalten ihre größte Wirkung zwar in der Anwendung auf Ballungsräume, sind aber vielfach auch für ländliche Regionen relevant.

Gebäude

Im Gebäudesektor könnten bereits heute ohne weitere Technologieentwicklung große Einsparpotenziale realisiert werden; vielfach scheitert dies aber an der **Umsetzung**. Ihre Erforschung er-

fordert neben ökonomischen insbesondere **verhaltenswissenschaftliche Ansätze**. Fassaden könnten besser isoliert werden; anstelle veralteter Heizungsanlagen könnten moderne, energiesparende Systeme eingebaut werden, Energiesparlampen könnten weitgehend die bisherigen Glühlampen ersetzen, Kraft-Wärme-Kopplung unter Einsatz von Nah- und Fernwärmenetzen würde die Gesamteffizienz der Systeme verbessern. Viele dieser Maßnahmen sind auf längere Sicht unter ökonomischen Gesichtspunkten besonders sinnvoll. Technologische Weiterentwicklungen erscheinen hier zum Teil nicht unmittelbar vordringlich, doch gibt es erheblichen Forschungsbedarf zur Frage einer besseren Umsetzung. Was sind die richtigen Anreizsysteme? Welche ökonomischen, rechtlichen und politischen Steuerungsinstrumente können dafür sorgen, die technischen Möglichkeiten auch auszureizen? In welcher Weise beeinflussen psychologische, kulturelle und institutionelle Kontextbedingungen die Geschwindigkeit, mit der Innovationen umgesetzt werden? Diese **Ziel- und Instrumentenwirkungsforschung** ist auch über das Problemfeld „energieeffiziente Stadt“ hinaus ein Thema, das dringend intensiver bearbeitet werden muss.

Gleichzeitig gibt es auch im Bereich der energieeffizienten Gebäude weiterhin technologisch geprägten Forschungsbedarf. Es müssen **architektonische und gebäudetechnische Konzepte** entwickelt werden, die den Heizwärmebedarf – und zunehmend auch den Kühlungsbedarf – von Wohngebäuden stark zurückdrängen und vom Verbraucher akzeptiert werden. Bei Gebäuden mit niedrigem Wärmebedarf könnten sich andere als die jetzigen Heizkonzepte durchsetzen, um den dann noch vorhandenen Restenergiebedarf zu decken, insbesondere in Verbindung mit **leistungsfähiger Sensorik**. Hier ist über Lebenszyklusanalysen zu untersuchen, welche Heiztechnologien am günstigsten sind. In einer zunehmend elektrifizierten Energieinfrastruktur könnten dies Wärmepumpen oder dynamische Flächenheizungen auf Elektrobasis ein. Derartige Systeme sollten besonders in den Schwerpunkt von Forschungsaktivitäten zur Effizienzverbesserung rücken. Heute ist die Bereitstellung von **elektrischer Energie für Heizungsanwendungen** zwar aufgrund des



Schematische Darstellung eines Passivhauses

niedrigen durchschnittlichen Wirkungsgrades des Kraftwerksparks mit relativ hohen Verlusten verbunden. Fortschritte bei der Kraft-Wärme-Kopplung und zunehmende Anteile regenerativer Energien an der Bereitstellung elektrischer Energie werden dieses Verhältnis jedoch verbessern, so dass die Nutzung elektrischer Energie für die Bereitstellung des Restwärmebedarfs akzeptabel oder sogar systemisch vorteilhaft werden kann.

Straßengebundene Mobilität

Der Verkehr wird in Deutschland – und weltweit – in den nächsten Jahren deutlich ansteigen. Von diesem Anstieg sind insbesondere die Ballungsräume als Kerne der Wirtschaftsentwicklung und der individuellen Mobilität betroffen. Ein konzentrierter Forschungsansatz zur Verkehrsproblematik ist also für die Realisierung energieeffizienter Städte wichtig. Dazu kommt die Forderung, CO₂-Emissionen in die Atmosphäre zu senken. Während in Kraftwerken und anderen konzentrierten CO₂-Quellen die Abscheidung an der Quelle zumindest grundsätzlich möglich scheint, ist dies bei verteilten, jeweils kleinen Quellen wie Autos kaum vorstellbar. Hier sind dringend Lösungen erforderlich.

Beim straßengebundenen Verkehr besteht die besondere Herausforderung darin, dass dieser momentan und vermutlich auch für die nächsten zwei bis drei Dekaden überwiegend auf den Einsatz flüssiger Energieträger in Verbrennungsmotoren angewiesen sein wird. Gleichwohl gibt es zu einer weitgehenden Entkarbonisierung dieses Teils des Transportsektors keine klimafreundliche Alternative. Klassische Verbrennungsmotoren weisen nach wie vor große **Verbrauchsoptimierungspotenziale** auf (PKW-Otto: ca. 35 %; PKW-Diesel: ca. 20 %), wobei zukünftige Motorentwicklungen auch zu einer Konvergenz der Diesel- und Otto-Technologie führen können. Hier ist auch ein enges Zusammenwirken entlang der Prozesskette **Kraftstoffherstellung – Verbrennung im Motor – Abgasbehandlung** ein unverzichtbares Element. Eine nachhaltige Lösung bezüglich des CO₂-Problems für Verbrennungsmotoren erscheint nur durch zunehmende **Kraftstoffdiversifizierung** insbesondere zugunsten von Bio-Kraftstoffen

(allerdings nur der 2. und 3. Generation) möglich. Damit verbunden ist Forschungsbedarf hinsichtlich der Technologieentwicklung und systemischer Aspekte, wie etwa der Nutzungskonkurrenz zu anderen Energie- und Rohstofftechnologien, die auf Biomasse zugreifen. Forschung zu Veränderungen des Verbraucherverhaltens (etwa Verzicht auf Fahrzeuge mit hoher Beschleunigungsleistung oder benzinsparendes Fahrverhalten) können die Aktivitäten zur Effizienzverbesserung auf der Angebotsseite auch seitens der Nachfrage unterstützen.

Angesichts der oben erwähnten Entwicklung hin zu einer weitgehend elektrifizierten Gesellschaft und der Erwartung, dass, unabhängig von der Energiebereitstellungstechnologie, die Mobilität zunehmend elektrisch gewährleistet werden muss, ist Forschung zu Konzepten zur Realisierung von **E-Mobilität** (Elektrohybrid bis E-Fahrzeug) und zur Sicherstellung einer entsprechenden Versorgungsinfrastruktur von besonderer Bedeutung. Dass sich energieeffiziente Städte als primäre Zielrichtung solcher Konzepte besonders gut eignen, liegt auf der Hand. Da die Umwandlung von elektrischer Energie in einen stofflichen Speicher und dann wieder zurück in elektrische



Elektroauto Chevrolet Volt (Bildquelle: General Motors)

NO REGRET-FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Energie mit erheblichen Verlusten über die gesamte Prozesskette hinweg belastet ist (derzeit muss mit 75 % Verlust gerechnet werden), sollten sich Forschungsanstrengungen **primär auf Batterie-konzepte** zur Realisierung von Elektrofahrzeugen richten. Diese Technologie wird unabhängig von den Randbedingungen benötigt und eignet sich aufgrund der limitierten Reichweiten, die für Batteriefahrzeuge auf absehbare Zeit erwartet werden, besonders für Ballungsräume. Forschungskonzepte sollten nicht bei der derzeit diskutierten Lithium-Ionenbatterie stehen bleiben, sondern auch **Systeme zukünftiger Batteriegenerationen** einschließen. Schließlich besteht großer Forschungsbedarf zur Frage **integrierter Mobilitätskonzepte**. Dabei geht es beispielsweise um die optimale Kombination von privaten und öffentlichen Transportmitteln und die gemeinschaftliche Nutzung von Fahrzeugen (Car Sharing, Fahrgemeinschaften, Car Pools). Auch städtebauliche Aspekte wie die „Stadt der kurzen Wege“ können Bestandteil integrierter Mobilitätskonzepte sein. Dabei sind technische, organisatorische und psychologische Aspekte eng miteinander verbunden.

Netze und Speicher

Die Entwicklungen im Bereich der energetischen Gebäudeversorgung und der elektrifizierten Mobilität sind im Zusammenhang mit dem zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien, insbesondere der Windenergie, an der Strombereitstellung zu sehen. Sie bedingen intensive Forschungsanstrengungen im Bereich der **elektrischen Netze und von Speichertechnologien**. Auch hier handelt es sich eindeutig um No Regret-Maßnahmen, da die erwartete verstärkte Elektrifizierung eine Anpassung, wahrscheinlich aber eine umfassende Neukonstruktion unserer Netzinfrastruktur unabdingbar macht.

Daher muss die Energieforschung auf alle Optionen gerichtet werden, die die Speicherbarkeit oder die stoffliche Nutzung von elektrischer Energie massiv verbessern und die dazu beitragen können, die bisherigen **Netzstrukturen in einem wesentlich komplexeren und dynamischen Umfang zu verstehen** und zu beherrschen. Die zu schaffenden Netzstrukturen müssen künftig



nicht nur die Abnehmer mit den Standorten der Kraftwerke und der großen Windenergieparks in Norddeutschland, bzw. off-shore und mit einer zunehmenden Elektrizitätserzeugung durch Photovoltaik oder Solarthermie, schwerpunktmäßig in südlichen Gegenden, verbinden. In ganz Europa werden zunehmend Regionen planerisch erfasst, die besondere Standortvorteile für unterschiedliche Arten regenerativer Erzeugung haben und die netztechnisch erschlossen werden müssen. Die Übertragung großer Energiemengen über weite Strecken – etwa von solarthermischen Anlagen in Nordafrika zu Nutzern in Deutschland – ist technisch aufwendig und stellt besondere Anforderungen an die Belastbarkeit der Netze. Zudem stellen sich hier Fragen der Versorgungs- und Importsicherheit.

In der Vergangenheit erfolgte die Ausgestaltung elektrischer Netze meist im Bereich von Teilnetzen auf der Basis quasistationärer Berechnungsmodelle. Demgegenüber wird in Zukunft eine **ganzheitliche und hochdynamische Untersuchung des Übertragungssystems** unter Einbeziehung aller Erzeuger, der Lastentwicklung und auch des adäquaten Speichereinsatzes erforderlich werden. Hierzu sind **Modellierungswerkzeuge** zu entwickeln, die sowohl hinsichtlich Größe als auch Dynamik den zukünftigen Anforderungen gerecht werden. Außerdem wird der Einsatz schneller Zustandsbeobachtungen durch Netzinformationssysteme erforderlich werden, um aus einer Zustandsbestimmung eine Stabilitätsanalyse bzw. Netzsicherheitsanalyse online durchführen zu können.

Zwar laufen viele Aktivitäten in die Richtung, Engpässe im europäischen 400 kV-Verbundsystem zu beseitigen, da aber in der zukünftigen Erzeugungsstruktur deutlich größere Entfernungen zwischen Erzeugung und Verbrauch verlustarm zu überbrücken sein werden, ist die schrittweise Etablierung einer überlagerten Spannungsebene in Europa unumgänglich, unabhängig davon, ob dies in Drehstrom- oder Gleichstromtechnik ausgeführt werden wird. Die Verknüpfung dieses **European Super Grid** mit den bestehenden 400 kV-Verbundnetzstrukturen wird ein hohes Maß an begleitender Forschung erfordern.

Um die Möglichkeiten eines intelligent geregelten Netzes (Smart Grid) voll auszunutzen, müssen auch die **Verbraucher einbezogen werden**, d.h. über geeignete Softwarekonzepte müssen in Zeiten knappen Angebots beispielsweise Geräte und Anlagen, bei denen dies unkritisch ist, abgeschaltet werden können (E-Energy). Dazu muss zum einen das Verbraucherverhalten intensiv untersucht werden, zum anderen sind aber auch Untersuchungen dazu erforderlich, in welchem Maße einzelne Verbraucher dies als unzulässigen Eingriff in ihre Privatsphäre empfinden würden und wie entsprechende **Barrieren abgebaut** werden können. Da Konzepte zur Elektromobilität und zur Neuauslegung der Netze voraussichtlich zeitgleich entwickelt werden, muss bereits frühzeitig eine enge Verbindung zwischen den Entwicklungen gewährleistet sein.

Es besteht zwar die Hoffnung, dass intelligent geregelte Netze unter Einbeziehung sowohl der Erzeuger als auch der Verbraucher einen erheblichen Teil der schwankenden Einspeisung und Nachfrage ausgleichen können. Dennoch wird es unabdingbar sein, für alle Zeitskalen (von Minuten bis Tagen) und auf verschiedenen Größenskalen **Speichertechnologien** zu entwickeln. Hierzu kommen unterschiedlichste Speicherkonzepte in Frage, für die unterschiedlich hoher Forschungsbedarf besteht. Auf **Systemebene** ist dazu zunächst zu untersuchen, welche Speichertechnologien in welcher Form untereinander und mit dem Netz optimal kombiniert werden können. Fast alle Speichertechnologien benötigen noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Für **Druckgasspeicher** (z.B. Kavernen in Salzstöcken) ist eine Verbesserung des Wirkungsgrades durch Entwicklung der adiabatischen Betriebsweise erforderlich. Für **elektrische Speicher** – wie Redox-Flow-Systeme oder konventionelle Batterien – muss die Speicherdichte verbessert werden; viele Systeme verfügen nicht über ausreichende Zyklenstabilität, auch die Schnelllade- und Schnellentladefähigkeit müssen in der Regel deutlich verbessert werden. **Latentwärmespeicher** werden bereits technisch eingesetzt, wie der $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ -Schmelzspeicher zur Pufferung der Tag/Nacht-Differenz im solarthermischen Kraftwerk Andasol in Spanien. Allerdings müssen hier

NO REGRET-FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

viele weitere Systeme identifiziert und entwickelt werden, die sowohl Niedertemperaturwärme für den Gebäudesektor als auch Hochtemperaturwärme für (solar)thermische Kraftwerke unterschiedlicher Bauart effizient speichern können.

Für größere Energiemengen wird eine stoffliche Speicherung unvermeidbar sein. Dazu bietet sich zunächst die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse an. Diese ist allerdings weit von der maximal möglichen Effizienz entfernt. Bei großskaliger Anwendung ist daher dringend die **Effizienz von Elektrolyseeinheiten** zu verbessern. Zu untersuchen ist dann auch, wie der Wasserstoff wieder – möglicherweise unter Einkopplung von Biogas – optimal rückverstromt werden könnte. Allerdings sollte hier auch auf der Systemebene untersucht werden, ob nicht ein alternativer Zugang zu großen, strategisch gespeicherten Energiemengen über andere Wege, etwa Biomasse, möglich ist.

Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz können interessante Marktpotenziale haben. Gerade im Bereich der Energieeffizienz könnten weltweite Märkte entstehen, auf denen Technologien zur CO₂-armen Energie-Bereitstellung, Umwandlung und Nutzung von Energie miteinander konkurrieren. Aber auch für den heimischen Markt eröffnen sich Chancen, wenn man etwa die Gebäudesanierungen nach der Einführung der Energieeinsparverordnung betrachtet. Aus diesem Grunde sind Forschungsanstrengungen sowohl im Bereich der **Technologien** als auch bei den **Maßnahmen zu ihrer Implementierung** (Information, Finanzierung, rechtliche Fragen) von besonderer Bedeutung.

Innovationen und Marktdurchdringung

Die Umstellung auf eine nachhaltige Energieversorgung wird nur gelingen, wenn die Voraussetzungen für Innovationen und deren Marktdurchdringung verbessert werden. Dies erfordert ein gründliches Verständnis der gesellschaftlichen, ökonomischen, politischen und rechtlichen Bedingungen der Entstehung und Markteinführung von innovativen Lösungen bei der Gewinnung, Umwandlung, Speicherung, Verteilung und Nutzung von Energie. Denn das Gelingen von Innovationsprozessen hängt nicht nur von exzellenter

Technik und wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit ab, sondern ebenso von ihren kulturellen, sozialen und rechtlichen Rahmenbedingungen. Insbesondere muss der Zusammenhang zwischen Technologiewahl und -entwicklung auf der einen, und Marktstruktur, rechtlichen Bedingungen und geeigneten Institutions- und Organisationsformen auf der anderen Seite besser verstanden werden. Zu untersuchen ist beispielsweise, was private und was staatliche Akteure dazu beitragen können, um innovative Technologien zu entwickeln und ihre Marktdurchdringung zu verbessern. Solche Fragen können allerdings nur beantwortet werden, wenn die klassischen Innovationskonzepte des Technology Push und Market Pull durch Netzwerkansätze ergänzt oder sogar abgelöst werden. Gerade für die Politikberatung sollten diese Untersuchungen möglichst quantitativ modelliert werden.

Prioritäre Forschungslinien sind hier die **Analyse kultureller und interkultureller Faktoren in der Verbreitung von Energietechnologien**, unter Berücksichtigung globaler Entwicklungen und Rahmenbedingungen. Weiterhin müssen **strukturelle Innovationshemmnisse** identifiziert und analysiert werden. Das reicht von rechtlichen Bedingungen (aus den Bereichen Zulassungs- oder Patentrecht) über wirtschaftliche Rahmenbedingungen (z.B. Flexibilitätssmargen oder unterschiedliche Effizienzanforderungen an Technologien mit unterschiedlicher Marktreife) bis hin zu sozialen oder institutionellen Faktoren (wie Präferenzen, Technikleitbildern, Organisationsformen oder Arrangements der Wissensgenerierung). Darüber hinaus sollten **normative Grundlagen und Regeln zur Gewährleistung von Innovationsverantwortung** (insbesondere bei Einführung neuer Technologien wie der CCS-Technologie) entwickelt werden. Schließlich gilt es, die Problemlösungskapazität **innovativer deliberativer und partizipativer Verfahren** (z.B. im Rahmen von demokratischer Technikentwicklung) zu analysieren und deren Praxistauglichkeit zu verbessern.

Ziele und Instrumente

Die Realisierung selbst von No Regret-Maßnahmen ist in einer pluralen und von Interessens-

und Wertkonflikten bestimmten Gesellschaft an die Wirksamkeit von politischen und rechtlichen Steuerungsprozessen gebunden. Ein umfassendes Verständnis der Wirkungen und Nebenwirkungen von energiepolitischen Instrumenten ist daher für die Gestaltung einer nachhaltigen und verantwortlichen Energiepolitik unabdingbar. Eine wirksame Energie- und insbesondere Klimapolitik ist auf der globalen Ebene auf die freiwillige Kooperation von 203 souveränen Staaten angewiesen. Es zeigt sich aber, dass die bestehenden Anreizsysteme nicht ausreichen, um beispielsweise die Bildung global verbindlicher Regelwerke zur Vermeidung von Kohlendioxidemissionen zu fördern. Zu fragen ist also, mit welchen spezifischen Anreizen wichtige Entwicklungs- und Schwellenländer und die Staaten der OPEC in ein effektives Klimaabkommen eingebunden werden können.

Ein weiteres Problem besteht in der Abhängigkeit von Energieimporten aus unsicheren Gebieten. Mit welchem Instrumenten- und Institutionen-Portfolio lässt sich diese auf möglichst wirtschafts- und sozialverträgliche Weise verringern? Insbesondere sollte untersucht werden, welche Bedeutung die Gestaltung internationaler Verträge bei der Gewinnung, Lieferung und Durchleitung von Energie und Energierohstoffen für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit und für das Nutzen- und Risikoverhältnis zwischen den Akteuren haben kann. Neben staatlichen spielen private Akteure eine entscheidende Rolle in der Energiepolitik. Hier ist von Interesse, welche Anreize Unternehmen dazu motivieren, externe Effekte zu internalisieren und durch ihr unternehmerisches Handeln übergreifende energiepolitische Ziele zu unterstützen. Für die Klimapolitik besonders relevant ist eine bessere Einschätzung der Wirkungen und Nebenwirkungen von alternativen Steuerungsoptionen (wie Cap and Trade Systeme oder Instrumente des Kapitalmarkts) oder neuen Technologien (wie Solarzellen, Clean Coal Technologien oder Geo-Engineering zur Erhöhung der Senkenkapazität für die Aufnahme von CO₂). Dabei stehen die Abhängigkeiten zwischen Erzeugungstechnologien, Verteilungsinfrastruktur und strategischem Verhalten von Akteuren im Vordergrund. Erforderlich ist diese Forschung nicht zuletzt für die Bewertung derzeit viel diskutierter Ansätze, die Klimaschutz-

ziele durch technologische Verbesserungen (siehe z.B. Clean Coal-Technologien) zu erreichen. Die Akzeptanz und die Durchsetzbarkeit technischer Entwicklungen sind eng an Wirkungsweise und Effizienz ökonomischer Instrumente und ihre rechtlichen und institutionellen Rahmenbedingungen gekoppelt.



© fotolia.de, Boguslaw Mazur

Eine **systematische, praxisbezogene und disziplinenübergreifende Ziel-, Instrumenten- und Wirkungsforschung** sollte deshalb einen hohen Stellenwert in der Energieforschung erhalten. Dabei sollten nicht nur ideale, sondern auch Real World-Voraussetzungen zugrunde gelegt werden. Folgende Schwerpunkte bieten sich an: Zum ersten sollten die **Effektivität und Effizienz einzelner Instrumente** (der direkten Steuerung ebenso wie der indirekten Anreize) und deren Zusammenspiel untersucht werden. Neben den wirtschaftlichen und sozialen sollten dabei auch die juristischen und institutionellen Rahmenbedingungen auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene berücksichtigt werden. Zum zweiten sollten die Erfahrungen, die **im Bereich zwischen Regulierung und Selbstregulierung** gemacht wurden, genauer analysiert und bewertet werden. Zum dritten sind organisatorische, institutionelle

NO REGRET-FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

und rechtliche Arrangements in **internationalen, europäischen und nationalen Mehrebenensystemen** auf ihre Wirksamkeit und Nebenwirkungen zu untersuchen.

Nutzerverhalten und Konsum

Neben der Notwendigkeit, innovative Prozesse zeit- und bedarfsgerecht einzuleiten, spielt die Untersuchung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen eine wichtige Rolle. Denn der Umgang mit Energiedienstleistungen und die Aufgeschlossenheit gegenüber verschiedenen Energiequellen wird maßgeblich von strukturellen, institutionellen und kulturellen Faktoren bestimmt. Zwar hat sich die Lebensstilforschung als eine vielversprechende Forschungsrichtung erwiesen, wenn aussagekräftige und differenzierte Ergebnisse zur Akzeptanz von Maßnahmen zur nachhaltigen Nutzung von Energie gefragt sind, es fehlen aber Querbezüge zwischen empirischen Untersuchungen und allgemeinen zeitgeschichtlichen Trends, die langfristige Konsum- und Nachfragemuster bestimmen und sich oft auch gegenüber kurzfristigen Steuerungsimpulsen durchsetzen. Dies ist Gegenstand geisteswissenschaftlicher, insbesondere historischer Forschung. Die umweltpsychologische Interventionsforschung hat Techniken zur unmittelbaren Verhaltensänderung und Methoden zur Bewertung ihrer Wirksamkeit entwickelt. Vergleichsweise wenig ist allerdings über das Konsumverhalten nicht-individueller Verbraucher, wie Handel, Handwerk und Kleingewerbe bekannt. Gleiches gilt für den indirekten Energieverbrauch durch Konsumgüter (etwa im Bereich der Unterhaltungselektronik, der Freizeitgestaltung oder der elektronischen Kommunikation), für den Einfluss

kultureller Bedingungen der Energienachfrage (Lebensstil, Milieu) sowie für das Verhalten der Verbraucher in Entwicklungs- und Schwellenländern.

Daher sollten folgende Schwerpunkte einer **integrativen Konsumverhaltens- und Akzeptanzforschung** gefördert werden: Zum ersten geht es um die Erforschung der **Präferenzen und Werte der Abnehmer** von Energiedienstleistungen und die Art und Weise, wie sich diese durch demographische, kulturelle und soziale Wandlungsprozesse verändern. Zum zweiten gilt es, die Forschung zu den **Anreizen** für private Akteure, Organisationen und staatliche Institutionen zu intensivieren, die geeignet wären, die Nachfrage nach Energiedienstleistungen in Richtung auf einen nachhaltigen Umgang mit Energie zu lenken. Zum dritten sollte die Frage untersucht werden, welche Faktoren die **Akzeptanz** von Energiesparmaßnahmen und von Energietechnologien in Haushalten, Betrieben oder Verwaltungen beeinflussen und welche Möglichkeiten bestehen, die Akzeptanz durch Modifikation von Technologien, Einführungsstrategien oder verbesserte Kommunikationsformen zu beeinflussen. Ein viertes Forschungsfeld sind die **situativen und strukturellen Kontextfaktoren**, die Einfluss auf das Verhalten von Individuen und Organisationen haben, und die Möglichkeiten, diese im Sinne einer auf Nachhaltigkeit orientierten Energiepolitik zu beeinflussen. Schließlich sollte die Konsumverhaltens- und Akzeptanzforschung stärker mit rechtswissenschaftlichen Fragen, beispielsweise zum Auftrag (und den Grenzen) staatlicher Informations-tätigkeit in der Energiepolitik, verknüpft werden.



III Forschungspotenziale für eine langfristig gesicherte und nachhaltige Energiezukunft

Einleitung

Im vorigen Kapitel wurden Forschungsfelder identifiziert, die unabhängig von politischen, gesellschaftlichen, ökonomischen und sonstigen Randbedingungen bearbeitet werden, weil sie entweder von überragender Bedeutung sind, oder unabhängig von politischen Schwerpunktsetzungen in jeder „Energiezukunft“ relevant werden. Viele andere Forschungsfelder in der Energieforschung sind ebenfalls sehr wichtig. Ihre relative Bedeutung hängt allerdings von zahlreichen Faktoren und politischen Weichenstellungen ab. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass Entscheidungen für bestimmte Energiequellen, sollten diese überhaupt in hinreichendem Maße zur Verfügung stehen, Konsequenzen für die Energieinfrastruktur und die Energienutzung haben. Daraus ergeben sich wiederum Erfordernisse für die Energieforschung.

Im Folgenden werden die Komponenten eines Energieforschungsprogramms daher für drei unterschiedliche Klassen von Primärenergiequellen diskutiert. Diese Darstellung sollte jedoch keinesfalls im Sinne von alternativen Szenarien verstanden werden. Vielmehr dient sie zur Schärfung des Blicks auf die **systemischen Implikationen**, die zu berücksichtigen sind, wenn bestimmte Weichenstellungen bezüglich der Quelle der Primärenergie getroffen werden. Wenn sich also die Politik beispielsweise für eine primär auf erneuerbaren Quellen beruhende Versorgungsstruktur entscheiden sollte, muss in der Forschung mit höchster Priorität an einer Verbesserung der zum Einsatz kommenden Netze und an neuen Methoden der Energiespeicherung gearbeitet werden. Bei einer im Wesentlichen auf fossilen Quellen beruhenden Struktur ist hingegen eine Konzentration auf Technologien zur Beherrschung der CO₂-Emissionen notwendig, die mit der Nutzung fossiler Energiequellen untrennbar verbunden sind. Die im Folgenden diskutierten Module

erlauben eine schlüssige Darstellung systemischer Implikationen. In allen drei Modulen zusammengefasst werden alle wesentlichen Handlungsfelder der Energieforschung angesprochen. Einige modulübergreifende Querschnittsthemen werden im Anschluss diskutiert.

Zukünftige Energielösungen werden nicht monolithisch gestaltet sein, sondern sich vermutlich als **Kombination verschiedener Energiequellen** erweisen. Die Zusammensetzung dieses Energiemixes kann jedoch heute weder für Deutschland noch für ein anderes Land vorhergesagt werden. Abhängig von der Erwartung, wie dieser Mix aussehen könnte, wird auch die Energiepolitik Prioritäten setzen, die wiederum Auswirkungen auf die Forschungspolitik haben können. Eine weise und vorausschauende Energiepolitik wird sich nicht ausschließlich auf eine Energiequelle oder eine Klasse von Energiequellen verlassen. Daher sollte **Forschungspolitik so offen gestaltet** werden, dass bei sich verändernden Rahmenbedingungen jeweils tragfähige Lösungen vorbereitet sind. Bei der Festlegung der Mischung sollen die folgenden Ausführungen eine Hilfestellung geben, No Regret-Aktivitäten sollten in jedem Falle und möglichst schnell begonnen werden.

Schon heute lässt sich aus diesen Überlegungen ein entscheidender Schluss ziehen, der in gewisser Weise einen Paradigmenwechsel illustriert: Langfristig müssen wir uns darauf einstellen, flexible Strategien bereitzuhalten, die sich an eine kurzfristige Änderung der weltweiten ökonomischen, sozialen und technologischen Rahmenbedingungen anpassen lassen. Insofern werden wir uns stärker als bislang auf permanente Transformationsprozesse einzustellen haben und lernen müssen, eine Reihe von Brückentechnologien und Krisenüberbrückungsstrategien bis zur Einsatzfähigkeit zu entwickeln, selbst wenn, je nach veränderten Rahmenbedingungen, nicht alle von ihnen benötigt werden.

Modul 1: Erneuerbare Energien

Erneuerbare oder regenerative Energien stammen aus nachhaltigen Quellen. Sie sind, an menschlichen Zeiträumen gemessen, unbegrenzt verfügbar und stehen hiermit im Gegensatz zu fossilen Energieträgern und Kernbrennstoffen, deren Vorkommen bei kontinuierlicher Entnahme stetig abnimmt. Erneuerbare Energien (aus **Biomasse, Sonne, Wind, Wasserkraft und Geothermie**) werden fossile Energien und Kernenergie langfristig ersetzen, da letztere nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehen und ihr Einsatz ökologisch zunehmend problematisch wird. Insbesondere tragen erneuerbare Energien wesentlich geringer zur globalen Erwärmung bei als fossile Energien. Die **Kernfusion** ist aufgrund der faktisch unbegrenzten Verfügbarkeit ihres Brennstoffs – der Wasserstoff-Isotope Deuterium und Tritium – den erneuerbaren Energien gleichzustellen.

In einigen Ländern (z. B. in Deutschland, Spanien, den USA, aber auch China) nimmt die regenerativ gewonnene Energiemenge derzeit rasch zu. Ein

weltweites Wachstum wird jedoch noch durch im Vergleich zu konventionellen Energieträgern teilweise relativ hohe Kosten erschwert. Außerdem sind einige der eingesetzten Technologien, wie etwa die Kernfusion oder photovoltaische Großkraftwerke, noch nicht in einem genügend fortgeschrittenen Entwicklungsstadium, als dass sie umfassend großtechnisch eingesetzt werden könnten.

Ein Energiesystem, das langfristig auf erneuerbare Quellen setzt, wird zumindest auf absehbare Zeit ein Szenario des eher knappen Energieangebots sein. Dies würde sich vermutlich erst bei einem Durchbruch in der Einführung von Fusionskraftwerken ändern. Daher ist **höchste Effizienz** in allen Bereichen auch bei vollständiger Implementierung erfolgskritisch. Der Übergang zu einer auf erneuerbaren Energiequellen beruhenden Energieversorgung kann unter anderem auch aus diesem Grund nur langfristig erfolgen. Fossile und möglicherweise nukleare Energiequellen werden deshalb mittelfristig noch eine wesentliche Rolle spielen.



Im Bereich der erneuerbaren Energien ist die Windenergienutzung technologisch am weitesten entwickelt. Allerdings sind zumindest in Deutschland die besten Standorte an Land weitgehend ausgenutzt. Mittlerweile sind aber Anlagen mit deutlich höherer Leistung als die meisten installierten Systeme verfügbar, so dass durch Ersatz alter Windkraftanlagen zusätzliche Kapazitäten auch an Land geschaffen werden können. Durch höhere Anlagen können auch Waldgebiete als mögliche Standorte für weitere Anlagen genutzt werden. Erhebliche Potenziale werden off-shore gesehen. Allerdings besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf im Hinblick auf die Robustheit der Anlagen, deren Wartungsarmut und Langzeitbetriebsfähigkeit. **Windenergie** kann als un stetig anfallende Quelle nur in einem stabilen integrierten Gesamtsystem mit ausreichender Speicherkapazität ihre volle Leistungsfähigkeit entwickeln. Daher sind intensive Forschungsanstrengungen im Bereich intelligenter Datenverarbeitungsmodelle und Kommunikationssysteme notwendig, um die **Vernetzung von Windkraftwerken** und anderen Erzeugereinheiten national und grenzüberschreitend entscheidend zu verbessern. Um den Ausgleich un stetig anfallender Energie europaweit zu ermöglichen, müssen Möglichkeiten zum verlustarmen **Transport von elektrischer Energie** erschlossen werden. Hier bieten sich **Hochspannungs-Gleichstromleitungen** an. Weitere Verbesserungen könnten durch **supraleitende Verbindungen** möglich werden.

Zeitlich häufig komplementär zur Windenergie fällt **direkte Sonneneinstrahlung** an. Aufgrund der in Deutschland im Vergleich z. B. zu Ländern des Mittelmeerraums schwächeren Sonneneinstrahlung werden die Kosten für die Erzeugung elektrischer Energie in solarthermischen Kraftwerken oder Photovoltaikanlagen in Deutschland immer deutlich höher sein als in Südeuropa oder Nordafrika. Daher sind **europaweite Systemlösungen** anzustreben. Diese machen allerdings die parallele Entwicklung und Implementierung von leistungsfähigen regionalen, **nationalen und internationalen Transportnetzen** notwendig. In einem derartig ausgleichenden Verbund könnten Speicher für die verschiedenen Energieformen nicht mehr so wichtig sein, wie in einem regiona-

len Versorgungssystem; nichtsdestoweniger sind auch im Bereich der Speicher Forschungsanstrengungen notwendig. Darüber hinaus sind die **internationalen Rechtsbeziehungen** so zu gestalten, dass ein solches System reibungsfrei etabliert werden kann. Weiterhin sind **ökonomische Modelle** zu entwickeln, die für alle beteiligten Partner (Erzeugerländer, Stromtransitländer, Verbraucherländer sowie die beteiligten nationalen und internationalen Unternehmen) akzeptable Konditionen bieten. Auch besteht sowohl technologisch als auch politisch-soziologisch erheblicher Forschungsbedarf zur Analyse der Anfälligkeit solcher Systeme gegen terroristische Angriffe und zu deren Prävention. Von ähnlicher Bedeutung und daher ebenfalls Forschungsthema ist die **Anfälligkeit gegen politische Erpressung**. Schließlich wird man damit rechnen müssen, dass es gegen Höchst- und Hochspannungstrassen zunehmende Widerstände von Anwohnern geben wird. Hier ist frühzeitig zu untersuchen, wie diesen begegnet werden kann.

Wissenschaftlich und technologisch nimmt Deutschland derzeit eine Spitzenstellung in der Solartechnologie – **Photovoltaik und Solarthermie** – ein. Sowohl in Bezug auf die Energieerzeugung als auch den wirtschaftlichen Erfolg durch Export von Spitzentechnologie erscheint daher die **Solartechnologie als ein prioritäres Handlungsfeld**. Um diese Technologien im Vergleich mit fossiler und nuklearer Bereitstellung von elektrischer Energie zunehmend wettbewerbsfähig zu gestalten, sind in der Forschung zahlreiche Problemfelder der Grundlagenforschung bis hin zur Anwendungsorientierung anzugehen. Dabei ist für ein **Verständnis von Photovoltaiksystemen** bedeutend, den Transport von Ladungsträgern und damit verbunden die elektronischen und strukturellen Eigenschaften der Grenzflächen in solchen Systemen besser zu verstehen. Ein bedeutendes Querschnittsthema ist auch die Entwicklung von transparenten Elektroden. Da derzeit nicht erkennbar ist, welche Technologie letztendlich die erfolgreichste sein wird, sollte ein möglichst breiter Forschungsansatz verfolgt werden, wobei ein wesentliches Ziel die **Kostenreduktion von Photovoltaiksystemen** ist. Dies könnte auf verschiedenen Wegen erreicht werden, etwa durch

FORSCHUNGSPOTENZIALE

Verringerung der Kosten des Absorbers durch verbesserte Synthesetechnologien oder durch die Entwicklung von Dünnschichtsolarzellen mit hoher Effizienz. Bei hoch konzentrierenden Solarzellen müssen weitere geeignete Materialsysteme identifiziert werden, mit denen hohe Energieausbeuten zu geringen Kosten erreicht werden können.

Ein hohes Potenzial für Kostensenkungen haben **organische Solarzellen**. Allerdings erfordern derzeit alle Elemente solcher Photovoltaiksysteme noch Durchbrüche, um an die Leistungsfähigkeit der anorganischen Systeme heranzureichen. Neue aktive Materialklassen müssen gefunden werden. Nicht zuletzt ist die Lebensdauer erheblich zu steigern, beispielsweise durch leistungsfähige Verkapselungstechnologien. Zur Kostensenkung wird es aber auch – unabhängig von der eingesetzten Technologie – erforderlich sein, **massentaugliche und kostengünstige Fertigungsverfahren** entlang der Produktionskette Zelle – Modul – Panel zu entwickeln. Auch muss bereits bei der Planung dieser Technologiekette auf Recyclingkreisläufe hingearbeitet werden, um eine möglichst nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten.

Alternativ zu Photovoltaikanlagen bieten für die zentrale Energiebereitstellung **solarthermische Kraftwerke** Lösungen, die derzeit Photovoltaikanlagen hinsichtlich Wirkungsgrad und Kosten überlegen und marktnäher sind. Forschung auf diesem Gebiet ist eher anwendungsorientiert und dient vornehmlich der Kostensenkung und Effizienzsteigerung. Bei den optischen Komponenten geht es um temperatur- und umweltbeständige Materialien, die sich bei maßgeschneiderten Eigenschaften auf beliebigen Oberflächen kostengünstig abscheiden lassen. Daneben ist die Entwicklung von hochtemperaturbeständigen und temperaturwechselstabilen Komponenten für Wärmeüberträger, Speicher und Strahlungsempfänger (Receiver) erforderlich. Um solarthermische Kraftwerke ohne wesentliche Tag/Nachtschwankungen betreiben zu können, sind kostengünstige **Materialien zur Speicherung von Wärme** auf dem richtigen Temperaturniveau erforderlich. Verfahren zum beschleunigten Altern, die der experimentellen Bestimmung der Lebensdauer dienen, sind auch für kurze Entwicklungszyklen von relativ großer praktischer Bedeutung. Zur Optimierung von Komponenten und des Gesamtsystems werden



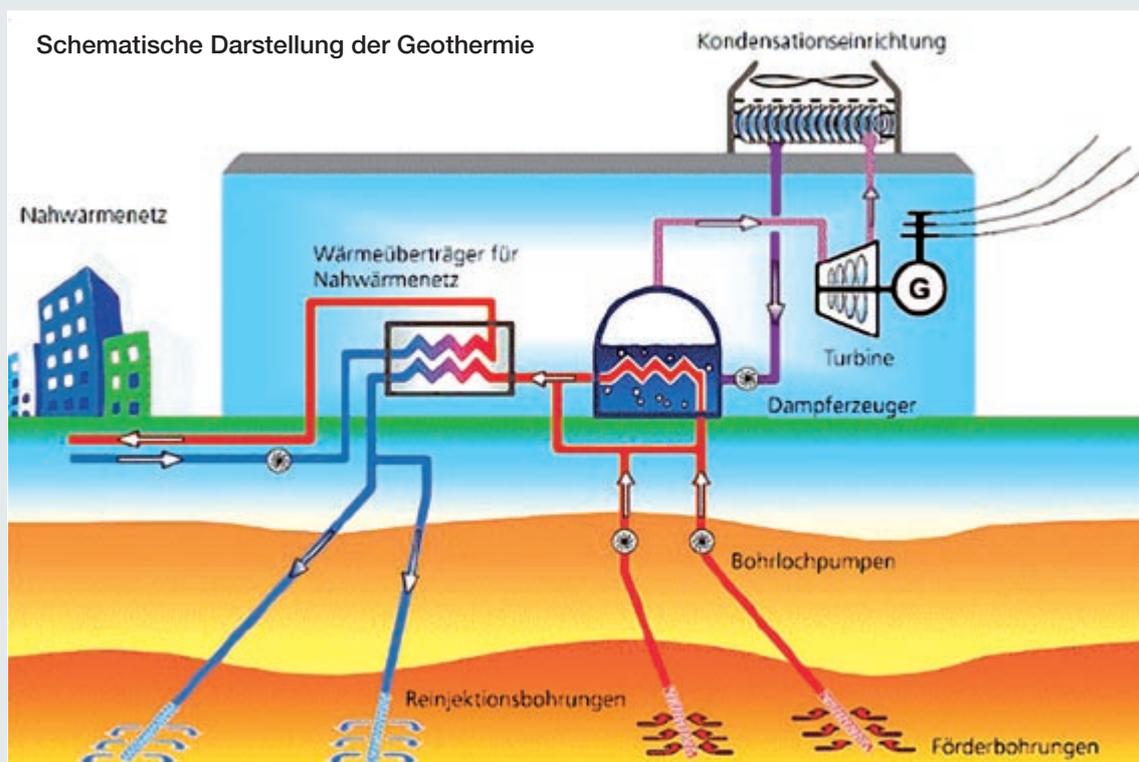
numerische Verfahren zunehmend an Bedeutung gewinnen, die ebenfalls weiterentwickelt werden müssen. Zur Erzeugung großer Mengen von Energie durch solarthermische Kraftwerke müssen Solarfelder mit mehreren Quadratkilometern Größe errichtet werden. Dies wird kostengünstig nur mit optimierten **Fertigungs- und Logistikkonzepten** möglich sein. Hinsichtlich der **Systemeinbindung** photovoltaischer oder solarthermischer Systeme in Netze gelten analog die Ausführungen, die bereits zu Windkraftwerken gemacht wurden.

Forschungsarbeiten und Demonstrationsprojekten zur wirtschaftlichen und sicheren Nutzung von **Geothermie** und **Biomasse** kommt in einem insbesondere auf erneuerbaren Energien beruhenden Energiesystem besondere Bedeutung zu, da beide Primärenergieformen grundlastfähig sind, während Wind und direkte Solarenergienutzung starken Fluktuationen unterworfen sind.

Bei der Erschließung von geothermischen Energiequellen sind die oberflächennahe und die tiefe Ausbeutung mit unterschiedlichen FuE-Herausforderungen verbunden. Insbesondere zur Nutzung

der **tiefen Geothermie** ist die Erweiterung auf stimulierte Wärmetauscher unverzichtbar. Voraussetzung ist hier die Entwicklung kosteneffizienter Prospektions-, Explorations- und Bohrtechniken. Integrierte Kraftwerks- und Wärmenutzungen mit neuartigen Kreisprozessen für die Nutzung geringerer Temperaturdifferenzen, möglicherweise in Hybrid-Kraftwerken, erlauben eine langfristige, CO₂-freie und mit wenig Flächenverbrauch verbundene Energiebereitstellung.

Die Nutzung von Biomasse als Energiequelle findet in Deutschland ihre obere Begrenzung dadurch, dass der derzeitige Primärenergieverbrauch doppelt so hoch ist wie der Energieinhalt der gesamten Pflanzenmasse, die jährlich netto in Deutschland durch Photosynthese gebildet wird. Die hochwertige und zugleich nachhaltige energetische Nutzung von Biomasse erfordert sowohl eine effiziente Erzeugung und Ernte von Biomasse als auch eine effiziente Verarbeitung und Umwandlung in andere Energieformen. Hoher Forschungsbedarf besteht bei den Technologien darin, aus Biomasse breit nutzbare chemische Energieträger zu erzeugen. Weiterhin sollten Effizienzsteige-



III FORSCHUNGSPOTENZIALE

rungen bei der Produktion der **Biomasse**, z. B. durch Züchtungsforschung oder den Einsatz grüner Gentechnologie im Bereich von Energiepflanzen realisiert werden. Alternativ zu landgebundener Biomasseproduktion ist zu untersuchen, inwieweit über die Produktion von angepassten Algen hohe Flächenerträge erreicht werden können. Daneben sind Verfahren weiterzuentwickeln, die Restbiomasse aus der Nahrungsmittelproduktion, andere biogene Reststoffe sowie Biomasse aus marginalen Standorten nutzen.

Biomasse ist ein verlustarmer, wenn auch nicht sehr effizienter, Speicher für Sonnenenergie, um deren zeitliche Schwankungen zu puffern. Zur optimalen Nutzung ist es unerlässlich, die verschiedenen Erzeugungs- und Nutzungsformen und -technologien **mittels Systemanalyse zu vergleichen**. Die Konkurrenz zwischen der Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel, als Rohstoff für die Industrie und als Energieform für unterschiedliche Einsatzzwecke (Wärme, Elektrizität, Flüssigkraftstoffe) muss dabei technisch, ökonomisch, ökologisch und sozial ausgewogen herausgearbeitet und bewertet werden. Neben der direkten Nutzung als Brennstoff wird zukünftig die Umwandlung von Biomasse in chemische Energieträger und Grundstoffe im Mittelpunkt von FuE stehen

müssen. Die Vielfalt der möglichen Produkte, insbesondere Bio-Slurry, Bio-SynCrude, Wasserstoff, Methanol, Ethanol und Methan, eröffnet hochwertige und breit nutzbare Optionen.

In einem überwiegend auf regenerativen Quellen beruhenden Energiesystem wird ein großer Teil der Endenergie in Form von elektrischer Energie zur Verfügung stehen. Diese Energieform muss in genau demselben Umfang verbraucht werden, wie sie erzeugt wird. Dies ist aufgrund unstetiger Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen aber nicht möglich. Daher ist das Problem der **Energiespeicherung** in einem solchen Szenario von nicht zu überschätzender Bedeutung und muss mit **höchster Forschungspriorität** angegangen werden.

Derzeit erscheint die direkte Speicherung von elektrischer Energie in **Batterien** unterschiedlicher Bauart insbesondere für kleine und mittlere Leistungen und Energiemengen der meistversprechende Weg zu sein, da dies mit den geringsten Verlusten verbunden ist. Erforderlich ist allerdings eine deutliche Reduktion der Herstellungskosten (Faktor drei) und eine Steigerung der Energie- und Leistungsdichte der Energiespeicher um einen realistischen Faktor zwei bis drei (Wunschziel: Faktor



fünf bis zehn), wofür die Lithium-Ionen-Technologie vielversprechende Optionen bietet. Gegenwärtig sind die Speicherdichten jedoch noch zu gering und die Systemkosten zu hoch. Notwendig ist daher die Erforschung und Entwicklung neuer Material-, Fertigungs- und Systemintegrationskonzepte, um den höheren Anforderungen hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer, Sicherheit und Optimierung der Kosten gerecht werden zu können. Zusätzlich müssen grundlegende Arbeiten an den **nächsten Generationen von Batterien** begonnen und mit zunehmender Intensität vorangetrieben werden.

Ähnlich geringe Verluste sind bei der Speicherung in Form von Pumpspeicherkraftwerken oder **Druckgasspeichern** zu verzeichnen, für die adiabate Versionen zu entwickeln sind.

Neben der Speicherung elektrischer Energie sind auch Wärmespeichermaterialien, insbesondere **Latentwärmespeicher**, wesentliche Komponenten, sowohl im Bereich der Bereitstellung von Niedertemperaturwärme zur Gebäudeheizung als auch zur Speicherung von Mittel- und Hochtemperaturwärme, um die Tag-/Nachtschwankungen von solarthermischen Kraftwerken auszugleichen. Eine Reihe von Latentwärmespeichern ist bekannt. Es wird jedoch erforderlich sein, für unterschiedliche Temperaturniveaus Speichersysteme mit hohen Speicherkapazitäten zu entwickeln, um jeweils angepasste Lösungen anbieten zu können.

Die lokalen Speicherkomponenten müssen durch ein „**intelligentes**“ **Stromnetz** für den überregionalen Transport und die lokale Verteilung effizient erschlossen werden. Die Echtzeit-Zustandsanalyse und Modellierung solcher hochdynamischer Netze stellt eine große Herausforderung dar, für die entsprechende Analyse- und Modellierungswerkzeuge erforderlich sind. Eine zentrale Laststeuerung im Netz kann auch durch softwaregesteuerten Zugriff der Energieversorger auf energieverbrauchende Aggregate beim Verbraucher erreicht werden. Hierzu werden viele Verbraucher jedoch nicht ohne weiteres bereit sein. Daher müssen derartige Umstellungen des Systems flankiert werden durch Untersuchungen zur Akzeptanz einer solchen Technologie, zur Effektivität wirtschaftlicher Anreize oder zur Möglichkeit gesetzlicher Regelungen.

Alleerdings ist nicht abzusehen, dass auch bei größten Forschungsanstrengungen genügend hohe Speicherdichten im Netz, in Batterien und in anderen Speichersystemen erzielt werden können, mit denen eine **strategische Energiereserve** für Deutschland aufgebaut werden könnte. Für diese Zwecke ist eine **stoffliche Speicherung** durch chemische Verbindungen hohen Energiegehalts unabdingbar. Hier ist systemische Forschung erforderlich, um solche Verbindungen zu identifizieren und dann für ausgewählte, vielversprechende Optionen eine Technologieplattform zu schaffen.

Als Energieträger- und -speichermaterialien werden derzeit insbesondere Wasserstoff, Methan und Methanol diskutiert. Wasserstoff hat u. a. den Vorteil, dass er ohne CO₂-Freisetzung verbrannt werden kann. Verglichen mit Methanol und Methan sind hinsichtlich Transport, Speicherung und Sicherheit jedoch noch massive Forschungsanstrengungen notwendig. Außerdem ist seine Erzeugung aus elektrischer Energie, die Speicherung und die anschließende Rückverstromung mit erheblichen energetischen Verlusten in Höhe von 60-80 % verbunden, so dass für die Einführung eines Wasserstoffsystems alle Komponenten dieser Wankungsketten entscheidend verbessert werden müssen. Methan und Methanol können bereits heute für mobile Anwendungen eingesetzt werden. Für Methanol ist die derzeitige Infrastruktur weitgehend nutzbar. Allerdings erscheint der Zugang zu Methanol energetisch wenig effizient. Eine Infrastruktur für Methan (Erdgasfahrzeuge) wird derzeit parallel zu der auf flüssigen Kohlenwasserstoffen basierenden Infrastruktur aufgebaut, Speicher für große Mengen stehen zur Verfügung. Prinzipiell gibt es viele Wege, die aus regenerativen Quellen zu Methan führen. Diese sind jedoch alle optimierungsbedürftig.

Vor allem die chemisch-thermischen Verarbeitungsprozesse zu hochwertigen synthetischen flüssigen Energieträgern (z.B. **Biomass-to-Liquid**-Kraftstoffe) ermöglichen eine unmittelbare Einbindung in die bestehende Infrastruktur. Die Entwicklung effizienter und großtechnisch umsetzbarer Herstellver-


FORSCHUNGSPOTENZIALE

fahren direkt aus Biomasse erfordert jedoch entsprechende Forschungsanstrengungen. Hier sind weitere Forschungsanstrengungen hinsichtlich der Erhöhung der Umsetzungseffizienz der Biomasse zu geeigneten Speichermolekülen notwendig. Die Technologieentwicklung muss von einer ökonomischen und soziologischen Forschung begleitet werden, um zu klären, welche der oben genannten Speichertechnologien Akzeptanzprobleme oder große ökonomische Hürden erwarten lässt.

Für ein Energiesystem, das wesentlich auf erneuerbaren Quellen beruht, stellt **Mobilität als Verbrauchssektor** mit derzeit etwa einem Drittel unseres Endenergieverbrauchs aufgrund der erforderlichen hohen Energiedichte des mitgeführten Kraftstoffs eine besondere Herausforderung dar. Kurz- bis mittelfristig wird der Anteil an Biokraftstoffen zunehmen. Forschungsbedarf besteht hier in der Erhöhung der Effizienz bei der Gewinnung der **Biokraftstoffe**. Darüber hinaus sind Nutzungskonflikte und ökonomische Randbedingungen grundsätzlich zu klären. Die oben beschriebenen Energiespeicheroptionen bzw. die Verbesserung der Leistungsfähigkeit von mobilen Batterien werden auch bei der Realisierung von **Konzepten zur Elektromobilität** eine wichtige Rolle spielen. Mittelfristig ist ein Szenario vorstellbar, in dem Kurzstrecken mittels Elektrofahrzeugen bewältigt werden, Langstrecken mit anderen Fahrzeugtechnologien, wie z. B. der Wasserstoffbrennstoffzelle oder Ähnlichem oder alternativ: mit öffentlichen Verkehrssystemen wie der Bahn. Forschungsanstrengungen sind in den Bereichen der Einbindung elektrifizierter Antriebe in das Stromnetz, der Speichertechnologien im Fahrzeug und der Energieumwandlungs- und Übertragungstechnologien notwendig. Eine derartige Umstellung unseres Mobilitätssystems würde sehr tiefgreifend sein und entsprechend lange Zeitskalen umfassen. Hier ist eine integrierende systemische Forschung zur Neustrukturierung und zu Umstellungsstrategien erforderlich. Des Weiteren besteht zum Teil erheblicher Forschungsbedarf zum Verbraucherverhalten, zur Akzeptanz und zu den politischen Rahmenbedingungen.

Ein Szenario, das überwiegend auf regenerativen Quellen beruht, ist im Wesentlichen ein Knapp-

heitsszenario. Darin wird die effiziente Bereitstellung und Nutzung von Wärmeenergie eine hohe Priorität erhalten, da sie etwa ein Drittel des Endenergiebedarfs Deutschlands ausmacht. Forschungsbedarf besteht hier insbesondere im Bereich des **energiegünstigen Bauens**, der **Niedertemperatur-Solarthermie**, der **Wärmespeicherung** in dezentralen Einheiten und der Anwendung von **Wärmepumpen** in weitgehend elektrischen Systemen. Ziel solcher Forschung muss es sein, im Bereich von Wärmeenergie fast vollständig auf extern gelieferte Energie verzichten zu können.

Langfristig muss angestrebt werden, auch in einem regenerativen Energiesystem aus einer erwarteten Knappheitssituation herauszukommen. Hier bietet die **Kernfusion**, die aufgrund der faktisch unbegrenzten Brennstoffvorräte und der nahezu CO₂-freien Energieerzeugung ebenfalls zu den regenerativen Energiequellen gezählt werden kann, langfristig die besten Perspektiven. Allerdings kann man mit einer großtechnischen Nutzung dieser Energiequelle erst in einigen Jahrzehnten rechnen. Der Weg dorthin erfordert die Optimierung plasmaphysikalischer Betriebs-szenarien sowie die (Weiter-)Entwicklung bzw. Qualifizierung kraftwerkstauglicher Technologien (Plasmaheizung, Brennstoffkreislauf) und Strukturmaterialien (niedrige Aktivierung durch Neutronen, kurze Abklingzeiten). Mit dem jetzt im Bau befindlichen Experimentalreaktor ITER werden die meisten Fragen zur Plasmaphysik geklärt und viele Technologien zur Einsatzreife gebracht werden. Mit dem Experiment Wendelstein 7-X wird ein alternatives Plasmaeinschlusskonzept für den kontinuierlichen Betrieb erprobt. Für die Materialqualifizierung wird eine zusätzliche Großanlage, die Fusionsneutronenquelle IFMIF, konzipiert. Auf der Basis der so gewonnenen Erkenntnisse kann dann das erste **Fusionskraftwerk** „DEMO“ in ca. drei Jahrzehnten in Betrieb gehen. Signifikante Beiträge zur Energieversorgung sind wohl erst für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts zu erwarten. Allerdings könnten durch kontinuierliche Forschung auf diesem Gebiet die Voraussetzungen für eine zeitgerechte Einführung der Kernfusion in den künftigen Energiemarkt geschaffen werden.



Zusammenfassende Bewertung der Forschungsprioritäten auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien

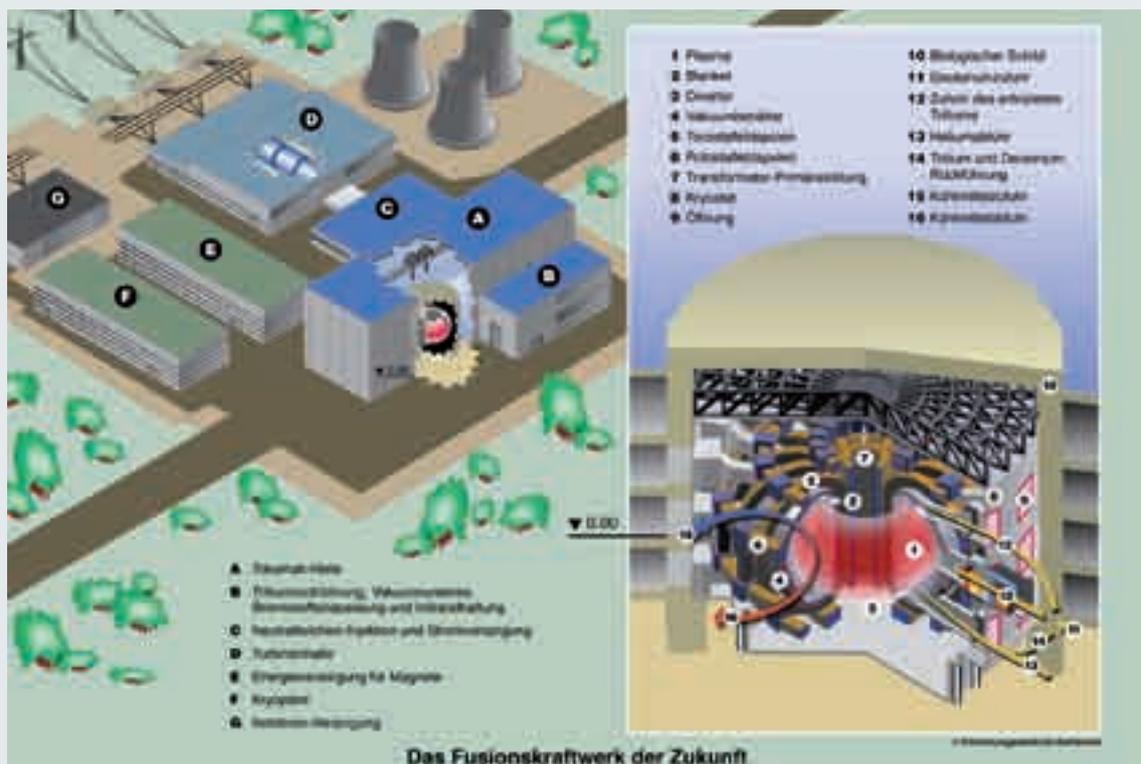
Die **Schlüsselfrage** der Forschung zu erneuerbaren Energien lautet: Wie lässt sich ein hoher Grad großräumiger **Vernetzung verschiedener – häufig fluktuierender – Energiequellen** erreichen, um die z. T. erheblichen Verluste, die mit der Speicherung von Energie verbunden sind, soweit als möglich zu vermeiden? Nichtsdestoweniger sollten **Speicher** sowohl zur Abpufferung von fluktuierender Erzeugung, als auch zur Gewährleistung eines Mobilitätsszenarios jenseits von Öl und schließlich als strategischer Langzeitspeicher auf stofflicher Basis Forschungsgegenstand von **höchster Priorität** sein.

Wesentlich ist auch die zunehmende **Erschließung solarer Strahlung** als Energiequelle zu akzeptablen Kosten. Allerdings muss die technologische Forschung in systemische Überlegungen auf europäischer, möglicherweise sogar übereuropäischer Ebene eingebettet werden.

Langfristig erscheint in einem regenerativen Energiesystem, aber auch grundsätzlich, die **Fusion** als eine sehr attraktive Option, die trotz der langen Zeitskalen weiterverfolgt werden sollte.

Modul 2: Fossile Energien

Fossile Energieträger decken, so die Internationale Energieagentur IEA, auch heute noch, trotz verschiedenster anderer Technologieoptionen, über 75 % des weltweiten Primärenergiebedarfs. Die ursprüngliche Dominanz der Kohle ist dabei dem Dreigestirn Kohle, Öl und Gas gewichen. Die fossilen Energieträger sind bis heute unerreicht in Energiedichte und Handhabbarkeit. Daher eignen sie sich besonders auch für mobile Anwendungen. Allerdings haben die Reserven, d. h. die derzeit technisch und ökonomisch nutzbaren Vorräte, nur eine begrenzte Reichweite. Somit besteht für die Nutzung insbesondere von Öl und Gas, mit relativ kurzen statistischen Reichweiten von 40 bis 60 Jahren, nur eine kurz- bis mittelfristige Perspektive. Daher dürften zumindest für die nächsten Jahrzehnte fossile Energieträger eine sehr



FORSCHUNGSPOTENZIALE

wesentliche Komponente unserer Energiesysteme bilden. Wenn beispielsweise nachhaltige Verfahren zur Kohlenutzung entwickelt werden könnten, könnten fossile Energieträger sogar eine längerfristige Option bieten.

Man sollte allerdings immer berücksichtigen, dass fossile Energieträger nicht nur verstromt werden. Vielmehr werden bedeutende Mengen fossiler Energieträger in der Eisen- und Stahlindustrie (Koks aus Steinkohle) sowie in der chemischen Industrie (Grundstoffe und Energieträger hauptsächlich auf Erdölbasis) verbraucht. Diese Abhängigkeit und die Folgen der Weiterentwicklung der Nutzung fossiler Energieträger für diese Sektoren sind nicht absehbar und erfordern daher tiefergehende systemanalytische Untersuchungen.

Fossile Energieträger müssen immer in Zusammenhang mit der Versorgungssicherheit diskutiert werden. Die deutschen Vorräte an Braunkohle sind erheblich, auch die Steinkohlevorräte sind beträchtlich, wenn heimische Steinkohle auch seit

langem ökonomisch mit Importkohle nicht konkurrenzfähig ist. Gegenwärtig verfügt Deutschland noch über eine eigene Erdgasförderung, die rund ein Fünftel des heimischen Bedarfs abdeckt. Das Ende dieser Reserven ist aber absehbar. Die Abhängigkeit von importiertem Erdgas hat in der jüngsten Vergangenheit wiederholt zu Lieferengpässen geführt. Zudem ist die Verlässlichkeit einiger Import- und Pipeline-Netzpartner fragwürdig. Die Versorgungssicherheit für Erdgas hat europäische Dimensionen. Die Kapazität bestimmter Knotenpunkte der europäischen Netzarchitektur kann gegenwärtig die Anforderung, die Versorgungssicherheit durch flexible Lieferrouen sicherzustellen, nur bedingt erfüllen. Ähnliche Überlegungen wie beim Erdgas gelten auch für die Versorgung mit Erdöl. Deutschland ist weitestgehend auf Importe aus teils politisch instabilen Regionen angewiesen. Daher gibt es besonders für eine energetische Zukunft, die stark auf fossile Energiequellen setzt, erheblichen Forschungsbedarf hinsichtlich der technologischen und soziokulturellen Rahmenbedingungen für eine stabile Energieversorgung.



Die Technologie zur Gewinnung und Wandlung **konventioneller fossiler Rohstoffe** ist bereits sehr hoch entwickelt. Dennoch kann auch auf diesem Gebiet durch Verbesserung der Effizienz die Reichweite der Energiequellen verlängert werden. Derzeit werden die Vorkommen insbesondere von Öl nur zu einem Anteil von 30-40 % ausgebeutet. Die Entwicklung von Enhanced Recovery Technologien hat auch bei geringen Steigerungen der Ausbeute einen enormen Hebel. Auch Verbesserungen in der Fördertechnik, etwa aus unterseeischen Vorkommen in Tiefen von 5000 m, können neue Vorkommen erschließen. Damit ließen sich Ressourcen, die mit vertretbarem ökonomischem Aufwand abgebaut werden können, in Reserven umwandeln. Ebenfalls sind Forschungen zu Verbesserungen in der Raffinerietechnik und damit verbunden zur Weiterentwicklung der Katalysatoren von großer Bedeutung. Allerdings sind im Bereich der Ölindustrie deutsche Unternehmen nicht sehr präsent – abgesehen von der Katalysatorindustrie und in Teilbereichen des Engineering, wo deutsche Firmen eine Spitzenstellung einnehmen. Daher sind im Bereich der Exploration, Enhanced Recovery und Raffinerietechnik Forschungsaktivitäten in Deutschland nicht prioritär, abgesehen von der **Katalysatorforschung** und **Teilbereichen der Raffinerietechnik**, die eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung haben und über den Export die deutsche Wirtschaft stärken, auch wenn die Anwendungen selbst nicht in Deutschland liegen.

Wegen der abzusehenden langfristigen Rohstoffsituation werden vermehrt sogenannte „**nicht-konventionelle**“ **Rohstoffvorkommen** zur Förderung in Betracht gezogen. Beim Erdgas ruhen die Hoffnungen auf Gashydraten, Einschlussverbindungen von Methan in einem Käfig aus Wassermolekülen. Ihr Vorkommen ist an bestimmte Druck- und Temperaturbedingungen gebunden. Sie finden sich in den Permafrostgebieten und in vielen Bereichen am Boden der Ozeane, wobei die Menge der Hydrate in den Meeren um mehrere Größenordnungen höher eingeschätzt wird. Die Schätzungen über die gesamten Ressourcen streuen sehr weit, zwischen etwa $3 \times 10^{15} \text{ m}^3$ und etwa $8000 \times 10^{15} \text{ m}^3$. Realistischerweise kann man davon ausgehen, dass die in

Gashydraten gebundene Menge an Erdgas die des konventionellen Erdgases um ein Mehrfaches übertrifft. Daraus ergibt sich primär ein hoher Forschungsbedarf hinsichtlich der Exploration möglicher Lagerstätten. Vor allem gilt es, tragfähigere Schätzungen über die tatsächlichen Vorkommen zu erhalten. Begleitend sollten die geologischen, geophysikalischen, geochemischen, mikrobiologischen, biogeochemischen und klimatologischen Grundlagen erforscht werden.

Wenn Gashydrate für die Förderung erschlossen werden sollen, ist die Entwicklung klima- und umweltgerechter Förder-, Verflüssigungs- und Transporttechnologien für eine wirtschaftliche Ausbeutung von Gashydratvorkommen zwingend notwendig. Zudem eröffnet dies beachtliches Exportpotenzial – Deutschland selbst verfügt über keine Vorkommen an Gashydraten, ist aber in der Grundlagenforschung international gut positioniert. Kurz- bis mittelfristig sollte dabei der Fokus zunächst auf der Entwicklung von Förderverfahren aus Permafrostböden bis hin zu möglichen Produktionstests liegen. Auf einer längerfristigen Zeitskala erscheinen die unterseeischen Vorkommen interessanter, wobei hier der Forschungsbedarf sowohl hinsichtlich der Grundlagen als auch der Produktionstechnologie deutlich höher ist. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass Gashydrate ein weit höheres Treibhauspotenzial haben als CO_2 . Die Verluste in die Atmosphäre bei der Förderung und Verarbeitung müssen also gering gehalten werden. In diesem Zusammenhang wird auch die Substitution von Methan aus den Hydraten mit CO_2 diskutiert. Eine solche Technologie hätte neben dem Potenzial, Methan abzubauen, den Vorteil, eine geologische Senke als CO_2 -Speichertechnologie zu erschließen. Dies stellt insbesondere für Deutschland eine interessante Option mit Exportpotenzial dar.

Mit steigendem Erdölpreis wird auch die Gewinnung von Öl aus nicht-konventionellen Quellen wirtschaftlich attraktiver. Die Größenordnung der Ölvorkommen in **Ölsänden und Ölschiefern** wird auf 13000 Exajoule (EJ) geschätzt und ist damit ebenfalls größer als die der bekannten Vorkommen an konventionellem Erdöl. Erste technische Umsetzungen zur Ölgewinnung in Kanada führ-

||| FORSCHUNGSPOTENZIALE

ten zu massiven Umweltbeeinträchtigungen. In Analogie zu den Gashydraten ist auch hier der **Entwicklung umweltgerechter und wirtschaftlicher Fördertechnologien Priorität** einzuräumen. Die Wirtschaftlichkeit einer Förderung nicht-konventioneller Vorkommen kann gegenwärtig nicht beurteilt werden. Angesichts der deutlich schlechteren Qualität der nicht-konventionellen Ölvorkommen werden adaptierte Prozesstechnologien mit angepassten Katalysatorsystemen erforderlich werden. Darüber hinaus ist zu untersuchen, inwieweit die als Nebenprodukt anfallenden Metalle die Metallmärkte verändern können.

Aufgrund der Tatsache, dass es weder Gashydrate noch nicht-konventionelle Ölvorkommen in Deutschland gibt, sollte die deutsche Forschung nur auf solchen Feldern konzentriert gefördert werden, auf denen sie über einen wissenschaftlichen oder technologischen Vorsprung verfügt. Interessant sind solche Vorkommen nicht zuletzt deswegen, weil sie aufgrund stärkerer geographischer Diversifizierung die Versorgungssicherheit erhöhen.

Die Hauptanwendung fossiler Energieträger liegt derzeit in ihrer **energetischen Nutzung**, wenn auch gerade im Falle des Öls die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie wegen der hohen Wertschöpfung von erheblicher Bedeutung ist. Die hohe Energiedichte fossiler Energieträger macht sie zu idealen Kandidaten als stofflicher Speicher für netzunabhängige mobile Anwendungen. Fossile Energieträger finden sich derzeit in allen Nutzungsbereichen, von zentralen **Kraftwerken** über die Erzeugung von Niedertemperaturwärme für Heizzwecke bis hin zum gesamten Verkehrssektor.

Ein modernes Kohlekraftwerk erreicht einen elektrischen Wirkungsgrad von über 45 %. Durch effektive Kraft-Wärme Kopplung kann der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks (Strom + Wärme) auf rund 80 % gesteigert werden. Ein noch besserer Wirkungsgrad kann prinzipiell durch erhöhte Betriebstemperatur und erhöhten Druck erreicht werden. Aktuell wird das Ziel verfolgt, eine Betriebstemperatur von 700 °C zu realisieren. Hierzu müssen erhebliche Forschungsan-



© fotolia.de, Sören Platten

besserer Wirkungsgrad kann prinzipiell durch erhöhte Betriebstemperatur und erhöhten Druck erreicht werden. Aktuell wird das Ziel verfolgt, eine Betriebstemperatur von 700 °C zu realisieren. Hierzu müssen erhebliche Forschungsanstrengungen in den **Werkstoff- und Materialwissenschaften** unternommen werden, da die gegenwärtig verfügbaren Werkstoffe chemisch und mechanisch nicht ausreichend robust sind. Dieselben Anforderungen gelten für die Erhöhung des Wirkungsgrades von modernen Gas- und Dampfturbinenkraftwerken.

Konventionelle Kraftwerke haben eine Lebensdauer von rund 30 Jahren. Die Erneuerung des Kraftwerksparks erfolgt daher langsam aber stetig. So sind hocheffiziente, neue und weniger effiziente, ältere Technologien parallel im Einsatz. Geschickt gewählte Anreize könnten zu einem beschleunigten Austausch existierender Kraftwerke führen. Hier sind systemische Forschungsansätze erforderlich, um die **Effektivität von weltweit wirksamen Anreizsystemen** in all ihren Konsequenzen modellieren und vorhersagen zu können. Dazu gehört beispielsweise auch die Analyse der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Kraftwerkshersteller, die weltweit eine führende Stellung einnehmen.

Im Falle der Kraft-Wärme Kopplung in Kraftwerken wird **Abwärme** effizient **genutzt**. Verwendet werden **thermische Speicher** auf Wasserbasis, die zur Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser eingesetzt werden. In Hochtemperaturanwendungen (um 1000 °C), wie z. B. in der Glasindustrie, kommen keramische Speichermaterialien sowie Gleitdruck- oder Ruthspeicher zur Bereitstellung von Spitzenlastdampf zum Einsatz. In vielen anderen Anwendungen, z. B. in der chemischen Industrie, entstehen bedeutende Wärmemengen, die in der Regel zwar abgeführt, aber nicht weiter genutzt werden. Daher versprechen Technologien, die in der Lage sind, Wärmemengen auch bei geringem Temperaturgradienten effizient zu nutzen, ein erhebliches Potenzial. Ziel weiterer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sollte die Entwicklung **thermo-chemischer Speicher** sein, die verschiedene Temperaturbereiche abdecken.

Auf dem **thermoelektrischen Effekt** beruht die direkte Umwandlung eines Temperaturgradienten in elektrischen Strom. Dies ist zur Zeit die einzige Technologie, die prinzipiell diese Möglichkeit eröffnet. Ihr Wirkungsgrad ist bisher jedoch begrenzt, und es werden keine kurzfristigen Durchbrüche erwartet. Dennoch sollte diese Technologie weiterentwickelt werden, da sie als einzige die direkte Nutzung von Abwärme als Strom ermöglicht und längerfristig zu erheblichen energetischen Einsparungen führen könnte. Hier ist sowohl Forschung im Grundlagenbereich erforderlich, wo es um das Verständnis des Zusammenhangs der thermoelektrischen Eigenschaften mit den atomaren und strukturellen Parametern der Materialien geht, als auch die empirische Entwicklung neuer Materialien mit verbesserten Leistungsdaten, insbesondere mit verbesserter energetischer Effizienz. Für die Anwendung ist die Kostensenkung entsprechender Systeme von hoher Bedeutung. Dazu müsste die Materialbasis auf kostengünstigere Ausgangsstoffe umgestellt werden, was zudem mit geringeren gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen verbunden sein könnte.

Mobile Anwendungen, mit Ausnahme des Schienenverkehrs, der zum großen Teil elektrifiziert ist, basieren hauptsächlich auf flüssigen Kraftstoffen, die sich durch relativ hohe Energiedichte und gute Transportierbarkeit auszeichnen und die heute überwiegend aus Erdöl gewonnen werden.

Schienenverkehr

Der Schienenverkehr ist in Deutschland zum großen Teil elektrifiziert. Dieselgetriebene Antriebe kommen nur in Strecken mit niedrigem Verkehrsaufkommen oder in speziellen Anwendungen (z. B. Bau- und Rangierbetrieb) zum Einsatz. Die Bahn betreibt ihre eigene Stromerzeugung über konventionelle Kraftwerke und ihr eigenes Stromnetz. Fortschritte der Kraftwerktechnologie kommen daher ebenfalls der Gesamtenergiebilanz des Schienenverkehrs zu Gute. Moderne Züge sind bereits heute mit Technologien ausgestattet, die es erlauben, Bremsenergie wieder ins Netz einzuspeisen. Gleichzeitig wächst der Energieverbrauch aber durch die Tendenz, zunehmend Züge mit hohen Geschwindigkeiten einzusetzen.



FORSCHUNGSPOTENZIALE

Fortschritte im Schienenverkehr sind hauptsächlich im Bereich der **Werkstoffwissenschaften** zu erwarten, die zu leichteren Zügen, verbessertem Rollverhalten und damit zu geringerem Energieverbrauch führen sollten. Das größte Einsparpotenzial liegt sektorübergreifend in einer Verschiebung des automobilgebundenen Personen- und Güterverkehrs auf die Schiene. Hierzu sollten Konzepte für eine stärker bedarfsausgerichtete Konzeption des Schienenverkehrs erarbeitet werden. Grundsätzlich stehen solche Konzepte immer in Zusammenhang mit der **soziologisch-psychologischen Frage nach dem Mobilitätsbedürfnis** und dessen realen Manifestationen im Sinn der Nachfrage einer Gesellschaft nach Mobilitätsleistungen (private PKW, Car Sharing, öffentlicher Nah- und Fernverkehr, Ersatz von Mobilität durch neue Kommunikationstechnologien). Die Frage, inwieweit die Arbeits- und Lebenswelt verschränkt werden oder voneinander getrennt bleiben, ist von erheblicher Bedeutung für den Energieverbrauch einer Gesellschaft.

Flugverkehr

Der Flugverkehr bedient sich ausschließlich des Treibstoffs Kerosin. Es gibt gegenwärtig keine überzeugenden Konzepte, die auf mittlere Sicht zu einem anderen Treibstoff führen könnten. Die

damit verbundene Abhängigkeit vom Rohöl lässt sich in gewissen Grenzen durch den Einsatz von biogenen oder künstlichen Kraftstoffen mindern. Forschungsbedarf besteht auch hier im Bereich der **Werkstoff- und Materialwissenschaften** mit dem Ziel, leichtere Materialien, beziehungsweise verbesserte Materialien für Turbinen und neue aerodynamische Konzepte zu entwickeln. Einsparungen lassen sich ebenfalls durch eine **systematische Analyse und Verbesserung bedarfsorientierter Verkehrsplanung** erreichen. Derzeit sind Flugreisen oft preiswerter als Bahnreisen, wodurch der Anreiz zu Fernreisen selbst für Kurzurlaube zunimmt.

Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr basiert zum großen Teil auf Verbrennungsmotoren, die schweres Dieselöl und Schweröl einsetzen. Die Maschinen erfüllen die Doppelrolle des Antriebs und des Generators für die Stromversorgung des Schiffes. Der Schwerpunkt der Aktivitäten liegt hier in der Entwicklung **alternativer Antriebskonzepte** und gegebenenfalls deren parallele Verwendung. Im Schiffbau liegt weiterhin ein Potenzial in der effizienten Nutzung der Abwärme. Interessant sind ebenfalls Entwicklungen im Bereich der Supraleitung, deren Einsatz wesentlich kompaktere Schiffsmotoren





ermöglicht. Diese befinden sich gegenwärtig im Demonstrationsstadium. Gegebenenfalls lassen sich diese Erkenntnisse auch auf einen Einsatz im Schienenverkehr übertragen.

Automobil

Der Autoverkehr ist der Sektor, in dem derzeit fossile Energie am stärksten dominiert. Allerdings werden hier auch am schnellsten Probleme im Hinblick auf Verfügbarkeit erwartet. Außerdem erscheint es kaum möglich, CO₂ aus mobilen Quellen wie Autos abzutrennen. In diesem Bereich der Mobilität besteht daher auch in einem fossilen Energiesystem hoher Forschungsbedarf zur Vorbereitung auf bevorstehende einschneidende Änderungen. Ein wesentlicher Teil des Automobilverkehrs wird auf **CO₂-neutrale Energiequellen** umgestellt werden müssen. Durch **Biomasse** allein wird dies nicht zu leisten sein. Daher ist auch in einem fossilen Energiesystem **Elektromobilität** – mit den oben bereits formulierten Forschungserfordernissen – von entscheidender Bedeutung. Dabei würden die CO₂-Emissionen zentral anfallen – bei der Produktion von elektrischer Energie oder von Wasserstoff, der im Auto in einer Brennstoffzelle verstromt würde. Zentral anfallende Emissionen ließen sich dann abtrennen und speichern.

Die Verwendung fossiler Energieträger ist inhärent mit der Produktion von CO₂, dem Endprodukt der Verbrennung, verbunden. Je nach Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis entstehen unterschiedliche Mengen an CO₂. Die seit der industriellen Nutzung von fossilen Energieträgern stetig ansteigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist ein wesentlicher Faktor im globalen **Klimawandel**. Eine möglichst umfassende Reduzierung der Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre bildet daher die wesentliche Voraussetzung für die zukünftige energetische Nutzung fossiler Energieträger.

Kohlendioxid-Management

Eine mögliche kurzfristige Strategie im Rahmen von fossilen Energieträgern ist die Umstellung von kohlenstoffreichen fossilen Energieträgern (Kohle) auf möglichst wasserstoffreiche und kohlenstoffarme (Erdgas). Eine solche Umstellung führt zu veränderten Interdependenzen und sollte im Zusammenhang der Versorgungssicherheit, des Klimaeffektes und der technischen Möglichkeiten systemisch analysiert werden. Gleichzeitig bedeutet die Umstellung auf Erdgas aufgrund der beschränkten Reserven nur eine Aufschiebung der Emissionen von CO₂ und bietet keine tragfähige langfristige Lösung der Klimaproblematik.



© fotolia.de, alexvs



© Daimler AG

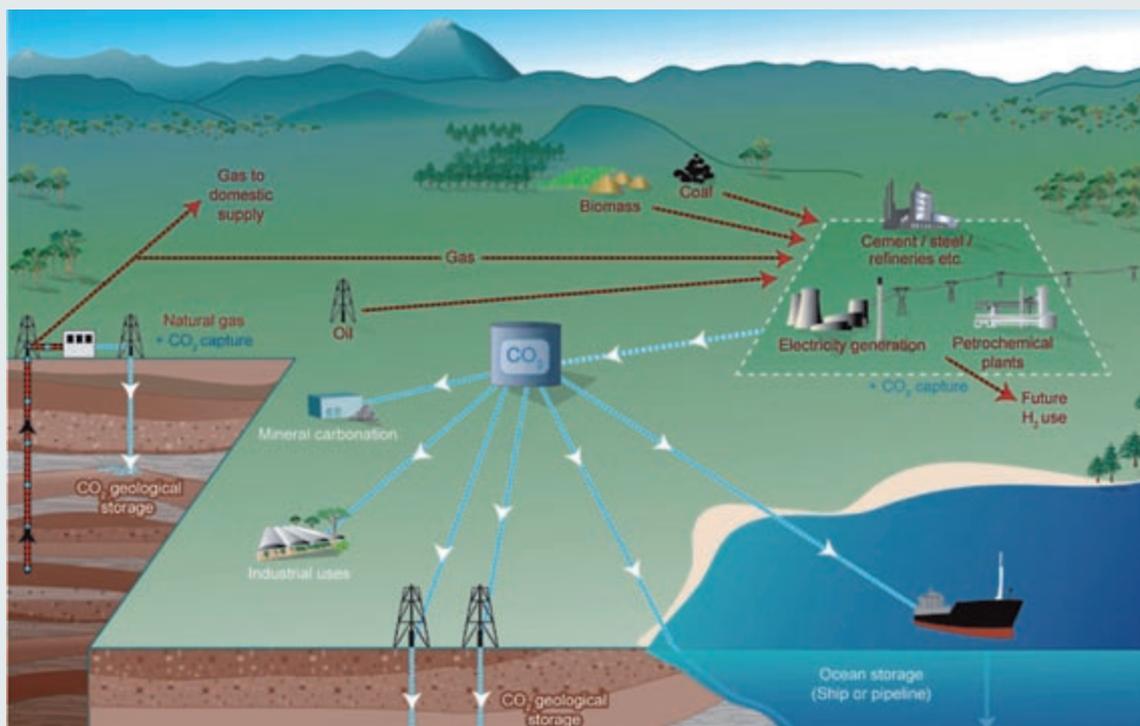
FORSCHUNGSPOTENZIALE

Auch in einem durch fossile Energieträger geprägten Energiesystem wird man andere Quellen, wie etwa Biomasse, soweit als möglich nutzen, insbesondere da diese in erster Näherung als klimaneutral angesehen werden können. Moderne Kohlekraftwerke sind in der Lage, eine mäßige Beimischung von Biomasse ohne Einschränkung des Wirkungsgrades zu verkraften. Dies hängt hauptsächlich mit dem variierenden Wasseranteil in der **Biomasse** zusammen. Biogas kann ohne weiteres in modernen Anlagen verfeuert werden. Dabei können Erfahrungen aus der Trocknung von Braunkohle auf Biomasse übertragen werden. Die wesentlichen Schwierigkeiten für eine umfassende Verwendung von Biomasse (und damit die Schwerpunkte von Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet) liegen in den **komplexen logistischen Herausforderungen der Produktionskette**, vom Anbau über Wachstum zu Ernte, Vorbehandlung und Transport.

Eine Schlüsseltechnologie, sowohl für die Wasserstoffproduktion, als auch zur „CO₂-freien Ver-

brennung“, ist die **Vergasung**. Dabei wird kohlenstoffhaltiges Material (von Kohle bis Biomasse) mit Wasser zu einem Synthesegas, das im Wesentlichen aus Wasserstoff und CO besteht, umgesetzt. Das Synthesegas lässt sich großtechnisch durch die sogenannte Fischer-Tropsch-Synthese umwandeln. Alternativ kann in einem weiteren Schritt, der Shift-Reaktion, mehr Wasserstoff und CO₂ produziert werden. Nach der Abtrennung von CO₂ kann das verbliebene, hauptsächlich aus Wasserstoff bestehende Gas in modernen IGCC- (**Integrated Gasification Combined Cycle**) Kraftwerken verbrannt werden.

In kleinerem Maßstab sind diese derartigen Kraftwerke Stand der Technik, jedoch ist noch viel Spielraum für Optimierung vorhanden, da diese Kraftwerke nicht die Effizienz von modernen konventionellen Kraftwerken erreichen. Dies ist unter anderem auf die Turbinentechnologie zurückzuführen, die gegenwärtig noch nicht in der Lage ist, das volle Potenzial der Wasserstoffverbrennung auszunutzen. Daher besteht im Bereich



Schematische Darstellung der geologischen CO₂-Speicherung (Quelle: GFZ Potsdam)



der **Werkstoff- und Materialwissenschaften** sowie der Verarbeitung akuter Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um korrosionsbeständige Hochtemperaturwerkstoffe für die Anwendungen in IGCC-Kraftwerken zu entwickeln. Die prinzipiell mögliche Kopplung einer Vergasung an ein IGCC-Kraftwerk in Kombination mit einer chemischen Fabrik zur Synthesegasnutzung würde es erlauben, je nach Nachfrage einen stofflichen Speicher (z. B. Kraftstoffe) und/oder Strom und Wärme zu erzeugen und damit Spitzenbelastungen abzufangen. Weiterhin ist es denkbar, ein IGCC-Kraftwerk mit einer Brennstoffzellenanlage zu koppeln. Es wird eine beträchtliche Wirkungsgradsteigerung prognostiziert. Die Umsetzung ist jedoch kritisch an weitere Fortschritte im Bereich der Brennstoffzellentechnologie gekoppelt. Solche Konzepte bedürfen der systemischen Analyse hinsichtlich der Einbindung in ein Energiesystem.

Eine signifikante Nutzung von fossilen Energieträgern ist unter den oben skizzierten klimapolitischen Bedingungen nur dann mittelfristig sinnvoll und globalpolitisch akzeptabel, wenn ein Weg gefunden wird, das entstehende CO₂ nicht in die Atmosphäre einzubringen. Hierzu werden eine Reihe von verschiedenen Technologien diskutiert (die sog. **CCS-Technologien**, Carbon Dioxide Capture and Storage, Kohlenstoff/CO₂-Abtrennung und Speicherung), die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden und alle noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufweisen. Alternativ sollten auch andere CO₂-Senken zur Entfernung des CO₂ aus der Atmosphäre untersucht werden. Schließlich werden auch sogenannte „Geo-Engineering“ Maßnahmen in Betracht gezogen, durch die die Aufnahmekapazität zum Beispiel der Weltmeere für Kohlendioxid erheblich ausgeweitet werden soll. Da es sich hierbei um schwerwiegende Eingriffe in das Ökosystem handelt, ist vor allem die Technikfolgenabschätzung in diesem Bereich unabdingbar. Welchen Weg man auch immer beschreitet, in einer Welt, die einen wesentlichen Teil ihres Energiebedarfs aus fossilen Quellen deckt, kann man auf Maßnahmen zum **Kohlendioxid-Management** nicht verzichten.

Kraftwerkstechnologien

Gegenwärtig ist nicht abzusehen, welche Technologieoptionen sich durchsetzen werden. Der grundlegende Gedanke hierbei ist, die Verbrennung so zu betreiben, dass das entstehende CO₂ möglichst einfach abgetrennt werden kann. Dieses wird dann einer Speicherung im Untergrund zugeführt und bleibt damit der Atmosphäre entzogen. Diese Kette enthält jedoch mehrere energieintensive Schritte, so dass eine Abtrennung und Speicherung von CO₂ immer den **Wirkungsgrad des Kraftwerks** im Vergleich zu einem konventionell betriebenen Kraftwerk ohne Abtrennung und Speicherung reduziert. Dies führt zwangsläufig zu einem höheren Primärenergiebedarf für die gleiche Leistung bzw. entsprechend höheren Energiekosten für den Verbraucher. Ziel der Forschungsaktivitäten muss es sein, diesen Malus möglichst zu reduzieren.

Eine Schlüsselstellung in dieser Kette kommt den **Abtrenntechnologien** zu. Es existieren umfangreiche Erfahrungen zur CO₂-Abtrennung aus der chemischen und petrochemischen Industrie, die hauptsächlich auf chemischen Wäschen beruhen und Stand der Technik sind. Die chemischen Wäschen benötigen einen beträchtlichen Energieaufwand für die Regeneration. Weiterhin werden auch physikalische Wäschen wie die Adsorption diskutiert. Die Regeneration erfolgt mit Hilfe eines Temperatur- oder Drucksprungs. Der Energieaufwand ist geringer, allerdings auch die Kapazität der Waschmittel. Die Entwicklung **alternativer Wäschen auf chemischer oder physikalischer Basis mit reduziertem Energieaufwand** stellt eine wichtige kurz- bis mittelfristige Forschungspriorität dar.

Die Anwendung der Wäschen auf Kraftwerksabgase stellt ebenfalls neue Anforderungen an die chemischen Eigenschaften der Waschmittel. Diese müssen auf einen immensen Durchsatz von zum Teil extrem korrosiven Substanzen ausgelegt werden. Prinzipiell jedoch können existierende Kraftwerke auf Basis fossiler Brennstoffe mit den entsprechenden Wäschen nachgerüstet werden, was ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist.

FORSCHUNGSPOTENZIALE

Eine weitere Technologie, die Teil einer Prozesskette zur Abtrennung und Speicherung von CO₂ sein kann, ist die **Verbrennung der fossilen Energieträger in Sauerstoff** und rezirkuliertem Abgas statt in Luft. Hierbei können höhere Temperaturen und damit theoretisch auch höhere Wirkungsgrade erzielt werden. Das Abgas enthält einen wesentlich höheren CO₂-Anteil als in einem konventionell betriebenen Kraftwerk, das CO₂ ist daher leichter abzutrennen. Die Bereitstellung von Sauerstoff kann über den energetisch aufwendigen Weg der kryotechnischen Luftzerlegung erfolgen. Alternativ wird die Anwendung selektiver Membranen propagiert. Diese Membranen erfüllen jedoch zurzeit nicht die dafür notwendigen Anforderungen. Intensive Forschungsanstrengungen im Bereich der **Membrantechnologie** müssen hier noch wesentliche Grundlagen schaffen.

Nach der Abtrennung muss das CO₂ einer Speicherung zugeführt werden. Hierzu wird das Gas überkritisch verdichtet und dann zum Speicherort transportiert. Im Wesentlichen werden gegenwärtig Erdgas- bzw. Erdöllagerstätten und saline Formationen diskutiert.

Erdgas- und Erdöllagerstätten sind in der Regel geologisch sehr gut erforscht. Werden sie noch genutzt, so kann die Speicherung von CO₂, je nach geologischen Gegebenheiten, effizient mit der Förderung kombiniert werden, wobei das CO₂ den Druck innerhalb der Lagerstätte erhöht und damit eine weitergehende Ausbeutung zulässt.

Im Gegensatz dazu ist die Speicherung von CO₂ in salinen Formationen (tiefe, salzwasserführende Sedimentgesteine) nicht mit wirtschaftlichen Vorteilen verbunden. Allerdings ist die geschätzte Kapazität der salinen Formationen deutlich größer. Hierbei wird CO₂ in die saline Schicht in Tiefen ab 800 m gepresst, wo es aufgrund der Temperatur- und Druckbedingungen überkritisch vorliegt. Zahlreiche Fragen zur **Stabilität des CO₂-Einschlusses** auch über längere Zeiträume hinweg sind allerdings noch offen.

Diese Technologie ist in mehreren Demonstrationsprojekten im Einsatz. Die längste Erfahrung ist mit dem Sleipner-Projekt von Statoil in Norwe-

gen gesammelt worden. Eine weitgehende Speicherung von Kraftwerksabgasen setzt die transparente Erstellung und neutrale Validierung eines geologischen Kriterienkatalogs voraus.

Eine weitgehende Speicherung von CO₂ hat Folgen, die über rein technische Aspekte hinausgehen. Einerseits sind viele Fragen offen. Neben Fragen der Risikoabschätzung betrifft dies Fragen zur Sicherheit und Überwachung der Lagerstätten, zum Aufbau einer Transportstruktur und zur Akzeptanz der Bevölkerung im Bereich der Lagerstätten. Weiterhin müssen gegebenenfalls erhöhte Energiepreise einschließlich der Auswirkung auf Verbraucher und die Wettbewerbsfähigkeit der energieintensiven Industrie betrachtet werden. Auf der anderen Seite könnten sich durch die Entwicklung effizienter CCS-Technologien neue Exportmöglichkeiten für das Hochtechnologieland Deutschland eröffnen.

Neben einer Speicherung von CO₂ ist auch eine **alternative Verwertung** im Sinne einer chemischen Umsetzung zu einem Produkt denkbar. Dazu müssten zum Teil neue Synthesewege und Wertschöpfungsketten etabliert werden. Das Mengenpotenzial der Verwertung ist im Vergleich zu den Emissionen jedoch vernachlässigbar. Allerdings könnte die mit ihrer Produktion verbundene Wertschöpfung einen Beitrag zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit der gesamten CO₂-Strategie führen, so dass im Sinne einer systemischen Betrachtung Ansätze für die stoffliche Verwertung durchaus sinnvoll sind.

Alternativ zur Abtrennung des CO₂ sollten allerdings auch Konzepte exploriert werden, die über andere Verfahren der Atmosphäre äquivalente Mengen CO₂ entziehen. Dies könnte durch Nutzung von Biomasse als CO₂-Senke geschehen, die Biomasse müsste dann allerdings langfristig gebunden bleiben. Eine Reihe von Vorschlägen hierzu (Carbonisierung und Einlagerung, unterirdische Einlagerung von Holz, Auslösen von verstärktem Algenwachstum durch Düngung) existieren bereits. Diese müssten allerdings umfassend systemisch, auch unter ökonomischen und soziologischen Aspekten und im Hinblick auf ihre Nachhaltigkeit, analysiert werden. Auch ist

für solche Ansätze zu analysieren, inwieweit die Nutzung von Biomasse als Kohlenstoffsенke die Produktion von Energie aus Biomasse durch Flächenkonkurrenz beeinträchtigt.

Zusammenfassende Bewertung der Forschungsprioritäten auf dem Gebiet der Fossilen Energien

In einem Energiesystem, das sich wesentlich auf fossile Energieträger stützt, ist die **Schlüsselfrage** mit dementsprechend höchster Forschungspriorität die **Minderung der Nettoemissionen von CO₂**. Forschungsanstrengungen sollten sich sowohl auf **Abscheide- und Lagertechnologien** bei der Verbrennung als auch auf **alternative CO₂-Senken** richten. Gesellschaftliche Aspekte sollten frühzeitig in die technologische Forschung mit einbezogen werden, da bei dieser Technologie mit erheblichen rechtlichen Problemen und Widerständen durch gesellschaftliche Gruppen und Anwohner zu rechnen ist.

Technologisch stellt sich bei allen Arten der Nutzung fossiler Energieträger die Frage nach neuen **hochtemperaturbeständigen Materialien** zur Erhöhung der Wirkungsgrade. Dies ist somit auch in einem fossil geprägten Energiesystem ein **prioritäres Forschungsgebiet**, wo deutsche Forschungsinstitute und Unternehmen zudem weltweit eine Spitzenstellung einnehmen.

Aufgrund der Schwierigkeiten, CO₂ aus mobilen Quellen, wie etwa Autos abzutrennen, ergibt sich auch in einem fossilen Energiesystem die Notwendigkeit, einen erheblichen Teil des Mobilitätsbedarfs elektrisch zu befriedigen. **Elektromobilität** ist also auch in diesem Modul ein Forschungsgebiet mit hoher Priorität.

Soziopolitisch stellt sich in einem kohlestoffbasierten Szenario am stärksten die Frage nach der **Versorgungssicherheit**. Hier liegen die prioritären Forschungsfelder in den Geistes-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Dabei geht es primär um wirksame und politisch durchsetzbare Steuerungsprozesse, die sowohl national (Genehmigungs- und Planungsverfahren) wie international (Liefersicherheit) betrachtet werden müssen.

Modul 3: Kernenergie

Deutschland hat – im Gegensatz zu den meisten anderen europäischen Staaten – den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen. Im Zuge dieses Beschlusses wurde auch die restliche Forschungsförderung mit Bundesmitteln zur nuklearen Sicherheits- und Endlagerforschung auf ein Minimum reduziert. Auch wenn Deutschland an diesem Beschluss festhalten und die Kernkraftwerke in den nächsten ca. 15 Jahren stilllegen sollte, ist ein hoher zusätzlicher **Forschungsbedarf** zu den Themenbereichen **nukleare Sicherheit, Endlagerung und Strahlenforschung** unabdingbar. Die sehr hohen deutschen Sicherheitsstandards weiterzuentwickeln und in die Entwicklung, den Betrieb und den Bau künftiger Kernkraftwerke andernorts auf der Welt einfließen zu lassen ist im allgemeinen Interesse wie im nationalen Eigeninteresse.

Gleiches gilt für die **Endlagerforschung**, bei der zum einen das hohe nationale Eigeninteresse besteht, die eigenen radioaktiven Abfälle einer sicheren Endlagerung zuzuführen. Zum anderen besteht aufgrund der vorhandenen Altersstruktur ein rasch zunehmender Bedarf an gut ausgebildeten Ingenieuren und Naturwissenschaftlern auf dem Gebiet der Kernenergie, um zumindest die vorhandenen Kraftwerke mit bestausgebildetem Personal zu betreiben sowie den Abbau der Kernkraftwerke und die Endlagerung mit den bisher üblichen höchsten Qualitätsmaßstäben sicher zu stellen. Den dringend erforderlichen Nachwuchs gewinnt man jedoch nur, wenn dieser im Rahmen einer qualitativ hochwertigen Forschung angezogen, motiviert und entsprechend ausgebildet wird.

Abhängig von politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen könnte sich Deutschland aber in der Zukunft wieder an der Entwicklung und dem Bau von neuen Kernkraftwerken beteiligen, um einen erheblichen Teil des Energiebedarfs mit Kernenergie zu decken. Eine solche Entscheidung hätte Konsequenzen für die Energieforschung nicht nur im Bereich der Entwicklung der Nukleartechnologien selbst, sondern auch in Bezug auf die Einbettung in ein umfassendes Energiesystem

FORSCHUNGSPOTENZIALE

mit allen technologischen und soziopolitischen Konsequenzen.

Ein Wiedereinstieg Deutschlands in die **Entwicklung von Kernkraftwerken** wäre dann denkbar, wenn Deutschland die geltenden hohen Sicherheitsstandards auch bei der Entwicklung von ausländischen Kernkraftwerken der dritten und vierten Generation mit Nachdruck implementierte, oder wenn sich in Deutschland im Verlauf der Zeit die Einsicht durchsetzen sollte, dass die Kernkraft trotz ihrer unbestreitbaren Risiken eine kostengünstige und konsensfähige Grundlast-Stromversorgung ohne CO₂-Ausstoß bietet. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund zu sehen, dass für **Kernkraftwerke der 4. Generation** eine weitere Verbesserung der Sicherheit mit einer bis zu 50-fach besseren Ausnutzung der Kernbrennstoffe erwartet wird, so dass die Verfügbarkeit von Kernbrennstoffen gegenüber den bisherigen Schätzungen entsprechend verlängert wird. Außerdem wird erwartet, dass sich durch die veränderte Art des Abbrands die Isotopenverteilung in Richtung schnell zerfallender Reststoffe

verschiebt, die dann auch in geringeren Mengen vorliegen sollen. Damit könnte die Abklingzeit der Reststrahlung um etwa zwei Größenordnungen reduziert werden.

Nukleare Sicherheitsforschung sollte in Zukunft fest in den europäischen Forschungsraum eingebunden werden. Durch die Weiterentwicklung der Kerntechnik sollen vor allem die jetzt schon sehr hohen Sicherheitsstandards und die Wirtschaftlichkeit nochmals verbessert sowie Fortschritte in Bezug auf die Nachhaltigkeit erreicht werden.

Die gegenwärtigen Pläne in den meisten EU-Mitgliedstaaten zielen darauf ab, die Laufzeit der Kernkraftwerke im Einzelfall über 40 bis auf ca. 60 Jahre hinaus zu verlängern. Reaktoren der 3. Generation, wie der EPR (Europäischer Druckwasserreaktor), basieren auf den Erfahrungen der heutigen Leichtwasserreaktoren und sind auf eine Betriebsdauer von mindestens 60 Jahren ausgelegt. Die **Sicherheitsforschung** für diese Reaktoren muss weiterhin Untersuchungen von Betriebstransienten, Auslegungstörfällen, sowie



Kernkraftwerk Gemeinschaftskraftwerk Neckar (GKN) bei Neckarwestheim, aufgenommen vom Burgfried des Schloss Liebenstein. In der Bildmitte die Zellenkühler von Block 1, Rechts der Hybridkühlturm von Block 2. (Quelle: FZK)



Störfällen, die zum Kernschmelzen führen könnten, beinhalten. Gerade die letztgenannten Störfälle der Sicherheitsebene 4 werden bei neuen Reaktoren zunehmend in das Genehmigungsverfahren mit einbezogen und bedürfen deshalb einer detaillierten Analyse. In Zukunft werden als Analysewerkzeuge verstärkt gekoppelte Programmsysteme eingesetzt, die fortgeschrittene 3-D Neutronenkinetikprogramme mit Programmen zur 3-D Untersuchung thermo- und fluiddynamischer Fragestellungen verbinden. Damit kann eine detailliertere Sicherheitsbeurteilung auch von **Reaktorsystemen der 4. Generation** vorgenommen werden (hier insbesondere die Weiterentwicklung der Leichtwasserreaktoren als HPLWR (High Pressure Light Water Reactor), einen LWR mit überkritischen Dampfzuständen).

Da Kernbrennstoffe ebenso wie fossile Energiequellen begrenzt sind, sind die Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennstoffe und die Mehrfachrückführung 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, was die Kernenergie auf mehrere Jahrtausende zu einer nachhaltigen Energiequelle macht, und b) eine Minimierung von Volumen und Wärmebelastung hoch radioaktiver Abfälle. Anlagen der 4. Generation müssen noch zur technischen Reife entwickelt werden; der wirtschaftliche Einsatz solcher Anlagen dürfte kaum vor Mitte dieses Jahrhunderts erfolgen, da für deren Entwicklung immer noch wichtige technische Details zu lösen sind. Hierzu gehören Untersuchungen thermohydraulischer und materialwissenschaftlicher Fragestellungen, bei denen das Potenzial von natrium-, helium- und bleigekühlten Anlagen zu überprüfen ist. Der bisher für Systeme der 4. Generation entwickelte Technologiefahrplan sieht unter anderem vor, übergreifende Forschung und Entwicklung auf den Gebieten **Sicherheitstechnologie, Brennstoffkreislauf, Brennstoffe und Werkstoffe** durchzuführen. Deutschland kann sich aufgrund seiner Expertise hier an vorderster Stelle beteiligen, um unter anderem höchste Sicherheitsstandards zu etablieren.

Der **geschlossene Brennstoffkreislauf** ist der Grundstein einer Strategie zur Abtrennung und Umwandlung (Partitioning and Transmutation) minorer Actiniden, wodurch Radioaktivität und Wärmebelastung der verbleibenden hoch radioaktiven Abfälle erheblich vermindert werden. Damit werden die Einschusszeit und die erforderliche Endlagerkapazität für die geologische Tiefenlagerung reduziert. Zur Umwandlung der minoreren Actiniden müssen die Möglichkeiten, die von Beschleunigergetriebenen Systemen (ADS) geboten werden, sicherheitstechnisch mit denen schneller kritischer Reaktoren verglichen werden.

Forschung und Entwicklung sind auch zur Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen für die sichere Endlagerung und zur Führung des Sicherheitsnachweises eines Endlagers erforderlich. Für die Wärme entwickelnden Abfälle ist ein geeignetes Endlager noch zu errichten. Die Zuständigkeit für die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet liegt in Deutschland beim Bund. Als mögliches Wirtsgestein für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle stehen in Deutschland **Steinsalzformationen** im Fokus. Eine weitere in



der Fachwelt diskutierte Möglichkeit ist die Endlagerung in einer **Tonsteinformation**. Der erforderliche technische Kenntnisstand für die Errichtung eines Endlagers im Steinsalz wurde durch die in den vergangenen 40 Jahren in Deutschland geleistete Forschungstätigkeit weitgehend erarbeitet. Für ein Endlager in Tongestein liegen umfangreiche wissenschaftliche Erkenntnisse aus Frankreich, Belgien und der Schweiz vor.

Die Langzeitsicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist jedoch durch technische Systeme allein nicht nachweisbar. Vielmehr muss das Verhalten langlebiger Radionuklide unter den geochemischen Bedingungen eines Endlagers in tiefen geologischen Formationen verstanden werden, um Werkzeuge und Daten für eine belastbare Langzeit-Sicherheitsanalyse bereitzustellen. Voraussagen zur Radionuklidfreisetzung über große Zeiträume, wie sie für solche Langzeitsicherheitsanalysen gefordert werden, lassen sich nur durch das Verständnis relevanter Prozesse auf molekularem Niveau und ihrer Anwendung auf natürliche Systeme erhalten. Die Arbeiten müssen strategisch so ausgerichtet werden, dass **grundlegende Untersuchungen zur aquatischen Chemie der Actiniden** und langlebigen Spaltprodukte mit **anwendungsorientierten Untersuchungen an realen Systemen** (Untertagelabors) synergistisch verknüpft werden. Für nicht wiederverwertbare Actinide und Spaltprodukte müssen langzeitstabile Endlagermatrizes entwickelt und charakterisiert werden. Vorhandene Immobilisierungstechniken wie die Verglasung müssen weiterentwickelt und den verschiedenen Abfalleigenschaften angepasst werden. Dies gilt auch für spezifische keramische Matrizes für Abfallformen fortgeschrittener Reaktoren.

Die bisherigen Probleme bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle liegen aber weniger in technischen oder geologischen Fragen begründet. Seit Jahrzehnten ist in Deutschland das Verfahren zur Bestimmung und Genehmigung eines Standortes im Fokus der Auseinandersetzung. Wie man politisch wirksam, gerecht und sozial akzeptabel einen Standort aussuchen und überprüfen soll, ist höchst umstritten. Rund 80 % der Bevölkerung in Deutschland sind der Meinung, dass dieses

Land ein nukleares Endlager dringend benötige, aber nur 12 % sind bereit, ein solches Lager in ihrer Nähe zu tolerieren. Bei kaum einer anderen Technologie sind **Akzeptanzverweigerung und Mobilisierung** so hoch wie bei der Frage der nuklearen Abfallentsorgung. Dementsprechend führen alle kurzfristigen und nur auf wirtschaftliche Kompensation ausgerichteten Maßnahmen zur Akzeptanzverbesserung ins Leere. Benötigt wird hier eine breit angelegte interdisziplinäre Forschung, bei der rechtliche, entscheidungsanalytische, planerische, soziologische, politikwissenschaftliche und psychologische Aspekte parallel behandelt und in partizipative Ansätze überführt werden müssen.

Systemische Auswirkungen

Kernenergie ist zunächst eine Technologie, die Grundlast in Form von elektrischer Energie bereitstellt. Erhebliche Mengen an fluktuierender Leistung – aufgrund der erwarteten stärkeren Elektrifizierung unseres Energiesystems würde dieser Anteil vermutlich noch zunehmen – müssten auf anderen Wegen bereitgestellt werden. Daher gilt für ein Energiesystem, das wesentlich auf Kernenergie basiert, hinsichtlich des **Forschungsbedarfs bei Verteilung und Nutzung** vieles von dem, was bereits in dem Modul Erneuerbare Energien angesprochen wurde – wenn auch in deutlich abgemildertem Ausmaß. Da unsere Gesellschaft sich stärker in Richtung elektrische Energie entwickeln würde, wäre auch das Mobilitätssystem betroffen. **Elektromobilität** mit dem daraus resultierenden Forschungsbedarf in Bezug auf Batterien und die Versorgungsinfrastruktur wäre eine wahrscheinliche systemische Folge eines starken Einsatzes der Kernenergie. Allerdings wäre der Druck zu raschen Entwicklungen auf diesem Gebiet nicht ganz so hoch, da durch Reduktion von CO₂-Emissionen im Kraftwerksbereich die Anforderungen an die Verringerung des Kohlendioxid ausstoßes im Verkehrssektor weniger dringlich wären – obwohl ebenfalls mittel- bis langfristig unumgänglich. Alternativ zum sehr starken Ausbau der Elektromobilität können Kernkraftwerke nicht nur zur Erzeugung von elektrischer Energie sondern auch von **Hochtemperaturwärme** eingesetzt werden. Diese könnte zur Erzeugung anderer Energie-

träger, wie etwa Wasserstoff, in großem Umfang dienen. Sie könnte damit den Weg zu **Synthesekraftstoffen** mit niedrigem CO₂-Ausstoß aus Biomasse, Gas oder Kohle erschließen. Vor einer großtechnischen Nutzung müssen jedoch noch folgende Parameter sehr sorgfältig untersucht werden: Temperaturniveau der nuklearen Wärmequelle, Gesamtverhalten der Spaltungsreaktion, Reaktorankopplung, Sicherheits- und materialtechnische Fragen. Deutschland sollte sich an diesen Arbeiten beteiligen, um sein einzigartiges Know-how auf den Gebieten der Sicherheitsforschung, der Hochtemperaturreaktortechnologie und der Wasserstoffsicherheit einzubringen. Allerdings muss auch bei der Erzeugung von Kraftstoffen über Hochtemperaturwärme die systemische Einbindung dieser Technologien in ein umfassendes Mobilitätskonzept mitbedacht werden.

Da Kernkraftwerke im wesentlichen Grundlastkraftwerke sind, stellt sich in einem nuklearen Modul die Frage, wie Verbrauchsspitzen abgepuffert werden können. Die Puffer- und Speicherfrage ist allerdings weniger kritisch als im regenerativen Modul, da bei einer im Wesentlichen regenerativen Energiebereitstellung sowohl die Angebotsseite als auch die Nachfrageseite fluktuiert. Für die nukleare Bereitstellung ist daher vornehmlich Forschung zur **Steuerung der Energienachfrage** notwendig, um die Nutzung zeitlich gleichmäßiger zu verteilen. Wie die verbleibende, kurzfristig erforderliche, schwankende Energie durch unterschiedliche Arten von **Spitzenlastkraftwerken** bereitgestellt werden kann, ist systemisch zu überprüfen. Für ausgewählte, geeignet erscheinende Technologien, die aufgrund der Klimaproblematik CO₂ neutral ausgestaltet sein müssen, ist dann gezielt Forschung zur Effizienzerhöhung und zur Systemeinbindung zu leisten, soweit die Technologien nicht ausgereift sind. Es ist also davon auszugehen, dass in einem Modul, das auf Kernenergie als wesentliche Bereitstellungstechnologie setzt, Forschung in erheblichem Maße auch auf den Gebieten erforderlich ist, die in Zusammenhang mit dem regenerativen oder dem fossilen Modul diskutiert worden sind, da nicht alle Arten der Nachfrage gut mit Kernenergie befriedigt werden können.

Aufgrund der Erfahrung mit **Widerständen gegen die Nutzung** der Kernenergie in den vergangenen Jahrzehnten ist zu erwarten, dass ein Wiedereinstieg nicht ohne größere gesellschaftliche Konflikte vonstatten gehen würde. Hier scheint es wichtig, durch **historische und soziologische Forschung** die Situation in der Vergangenheit zu analysieren und mit der heutigen oder zukünftigen Lage zu vergleichen, um daraus Schlüsse für die zu erwartenden gesellschaftlichen Reaktionen ziehen zu können. Außerdem müssen bei einer Wiederaufnahme der Forschungsarbeiten zu neuen Reaktoren bereits frühzeitig Ansätze entwickelt werden, mittels derer die Technologie gegebenenfalls umgesetzt werden könnte, ohne Widerständen zu begegnen oder – für den Fall, dass dies nicht möglich ist – mit diesen Widerständen konstruktiv umzugehen.

Die Gefahr der **Proliferation** stellt in einem massiv auf Kernenergie setzenden Energiesystem ein großes Problem dar – sowohl im Hinblick auf Staaten, die Zugang zu Atomwaffen erlangen könnten, als auch auf terroristische Gruppen. Hier sind flankierend zur technologischen Forschung dringend Arbeiten erforderlich, um dieses Problem besser analysieren zu können. Es ist ebenfalls nötig, über Mechanismen zu forschen, mit denen dieser Gefahr auf internationaler Ebene wirksam begegnet werden kann.

Auch wenn Deutschland an dem beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie festhalten sollte, ist es ratsam, die nukleare Forschung in Deutschland weiterzuführen, um einerseits die Sicherheit bei den bestehenden nuklearen Anlagen weiterhin sicher zu stellen oder zu verbessern und andererseits bei den noch nicht gelösten Problemen überzeugende Konzepte zu entwickeln.

IV WISSENSCHAFTLICHE QUERSCHNITTSTHEMEN

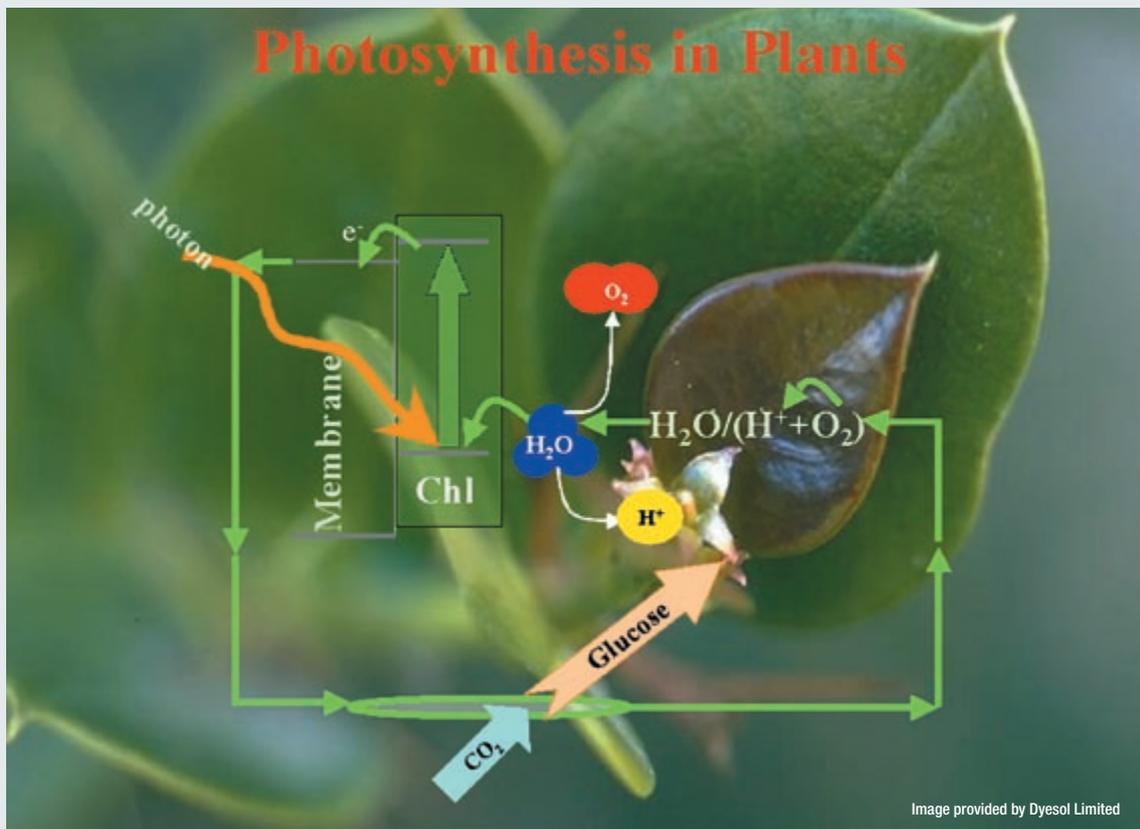
IV Wissenschaftliche Querschnittsthemen für den Übergang zu einer nachhaltigen Energiegesellschaft

Naturwissenschaftliche Grundlagen von Energietransferprozessen

Viele der unter den No Regret-Themen und in den Modulen angesprochenen Forschungserfordernisse sind stark technologisch geprägt. Sie dienen der Weiterentwicklung grundsätzlich bekannter Technologien oder – bei weniger ausgereiften Verfahren – der Umsetzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse in nutzbare Technologien. Allerdings ist es erforderlich, auch grundlegend naturwissenschaftlich an Fragen der Energiebereitstellung und des Energietransfers zu arbeiten, um neue Phänomene zu entdecken, die in Richtung auf Ener-

gietechnologien genutzt werden können. Solche Entdeckungen werden oft nicht durch gezieltes Forschen möglich sein, sondern dadurch entstehen, dass Wissenschaftler auf einem Gebiet aktiv sind, das Bezüge zur Energieforschung aufweist. Daher sollten in gewissem Umfang Arbeiten gefördert werden, die grundlegend auf Probleme gerichtet sind, die für Energietechnologien potenziell relevant sind.

Beispielsweise sind **Mehrelektronentransferprozesse** molekular wenig verstanden, obwohl sie von großer Bedeutung in einer Reihe von Energiewandlungsprozessen sind, wie etwa bei der



photokatalytischen oder elektrolytischen Wasserspaltung sowie bei molekularen Prozessen in Batterien. Das Verständnis der **Wachstumsregulation** von Pflanzen gehört ebenfalls zu diesen grundlegenden Problemen. Einsichten hier könnten zu neuen Ansätzen bei der Erzeugung von Energiepflanzen führen. Mikrobiologische Arbeiten zur Sukzession von Bakterienpopulationen bei der Methanproduktion oder die molekularen Grundlagen katalytischer Prozesse sind Beispiele dafür, wie Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in die Technologieentwicklung einfließen und etwa bei der Transformation von Biomasse zu Kraftstoffen eine große Bedeutung in jetzigen und zukünftigen Energiesystemen bekommen. Die Kopplung von biologischen und physikalisch-chemischen Ansätzen wird deutlich bei Arbeiten zur Wasserstoffproduktion aus Algen, bei denen die molekularen Mechanismen besser verstanden und die Organismen optimiert werden müssen. Diese Aufzählung ist nur beispielhaft zu verstehen. In der Forschungsförderung sollte es eine Offenheit für grundlegende Fragestellungen geben, die das Potenzial haben, in Anwendungen auszustrahlen.

Szenarienbildung und Krisenmanagement

Wenn man die No Regret-Maßnahmen mit verschiedenen Elementen der Module zur Bereitstellung und Nutzung von Energie kombiniert, entstehen Szenarien, die im Idealfall sowohl die technische Machbarkeit wie die gesellschaftliche Wünschbarkeit widerspiegeln. Diese Szenarien sind in Beziehung zu wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Wandlungsprozessen zu setzen. Sie müssen systematisch erfasst und im Zeitablauf auf der Basis unterschiedlicher Annahmen modelliert werden. Insofern reicht auch nicht ein einziges Energieszenario aus. Vielmehr müssen eine Reihe von Szenarien parallel entwickelt werden, denen jeweils unterschiedliche Annahmen und politische Präferenzen zugrunde liegen. Die drei oben beschriebenen Module könnten beispielsweise in unterschiedlicher Ausprägung in ein in sich konsistentes Szenario eingebracht werden, um bestimmten Anforderungen der Versorgungssicherheit, Zuverlässigkeit, Umwelt- und Klimaverträglichkeit sowie der sozialen Akzeptanz zu genügen.

Meist wird bei Energieszenarien von kontinuierlichen Kontextbedingungen ausgegangen. Für die Energiepolitik ist es aber ebenso bedeutsam zu erfahren, welche Kombinationen von Techniken zu keiner befriedigenden Lösung führen, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit Krisen auslösen können, und wie Energiesysteme ihrerseits auf Krisen in anderen Bereichen reagieren. Erst wenn auch der Einfluss von Entwicklungsbrüchen untersucht wird – sowohl in den technischen, als auch in den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Prozessen – können intendierte und nicht-intendierte Nebenwirkungen von Energietechnologien und energiepolitischen Maßnahmen genauer erfasst und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Daneben ist energiepolitisch auch die **Entwicklung von Second Best-Szenarien** erforderlich. Sie zeigen mögliche Handlungswege für den Fall, dass, aus welchen Gründen auch immer, die besten Szenarien nicht verwirklicht werden können. Was wäre zum Beispiel energiepolitisch zu tun, wenn es kein Folgeabkommen nach Kyoto mehr gäbe? Gerade dieser Frage nachzugehen und dabei die dann noch verbliebenen Handlungsmöglichkeiten mit ihren wirtschaftlichen und ökologischen Implikationen systematisch zu erfassen, wäre eine vorrangige Aufgabe der Szenarienforschung.

Methodische Herausforderungen bestehen in der adäquaten Behandlung von hoch komplexen und unsicheren Wirkungsketten. In integrierten Modellen werden zwar Verhaltensweisen von Individuen und Organisationen einbezogen, die dazu verwendeten Algorithmen sind empirisch allerdings noch wenig überprüft und gehen von sehr vereinfachten Annahmen aus. Oft bleiben dabei Aspekte wie die Einflussmöglichkeit der Akteure (Agency), die Machtstrukturen und die institutionellen Rahmenbedingungen für individuelles Handeln unberücksichtigt. Ebenso hat die historische Betrachtung von längerfristigen Entwicklungen und Entwicklungsbrüchen noch wenig Niederschlag in den Energieszenarien gefunden. Diese Themen näher zu erforschen und sie für die Energieplanung und Szenarienentwicklung aufzubereiten, ist eine der wesentlichen Forschungsaufgaben in diesem Untersuchungsfeld.

Vor allem soll daran gearbeitet werden, kausale oder funktionale Zusammenhänge, die den unterschiedlichen Szenarien zugrunde liegen, so weit wie möglich empirisch zu verifizieren und die häufig nicht-linearen Wechselbeziehungen angemessen zu modellieren. Dazu muss das **Verhalten von Marktteilnehmern und seine Abhängigkeit von unterschiedlichen Marktstrukturen** systematisch erforscht und in die Szenarien integriert werden. Weiterhin müssen die Möglichkeiten und Grenzen des technischen Fortschritts und der darauf aufbauenden **Energieinnovationen (in Bereitstellung, Transport und Nutzung) in Szenarien integriert** und deren Wechselwirkung mit den Leitbildern und Modellen zukünftiger Energiegesellschaften („Energiezukünfte“) analysiert werden. Dabei gilt es vor allem die **zeitlichen und räumlichen Interaktionen zwischen der Dynamik von Energiesystemen und den politischen, rechtlichen, wirtschaftlichen, sozialen und internationalen Entwicklungen** sowie zwischen normativen Zukunftserwartungen (z. B. zur nachhaltigen Entwicklung) und der Energiesystemdynamik zu beachten. Schließlich müssen **sprunghafte und krisenhafte Entwicklungen** als Möglichkeiten mit in die Zukunftsplanung einbezogen werden. Sie sollten daher in die Modellierung und Szenarienentwicklung einfließen. Vor allem in den Krisenplänen und im Rahmen der Katastrophenvorsorge sind Modellierungen von Systemeinbrüchen bis hin zu Zusammenbrüchen von großem Nutzen.

Auf dem Weg zu objektivierbaren Energieszenarien wird empfohlen, numerische und qualitative Modellierungsmethoden aus verschiedenen Disziplinen auf ihre Tauglichkeit zu prüfen, zusammenzuführen und daraus neue Verfahren zur Analyse komplexer Sachverhalte zu entwickeln. Dazu gehören stochastische Modellierungen, die zeitlich hochauflösende Energiesystemmodellierung, die detailliertere Erfassung von Energietransportnetzen und Energieverteilnetzen, die evolutorische Modellierung von Veränderungsprozessen und eine intelligente Kombination von Modellen aus unterschiedlichen Disziplinen und Denkschulen. Durch methodische Metastudien sollte angestrebt werden, Ergebnisvarianzen von unterschiedlichen Energiesystemstudien besser zu verstehen.

Märkte, Staat und Zivilgesellschaft (Governance)

Energiemärkte, ihre Dynamik und ihr Zusammenspiel mit anderen Märkten sowie mit staatlichen und zivilgesellschaftlichen Kräften, sind bislang noch wenig verstanden. Der Energiemarkt steht mit vielen anderen Märkten in direkter Beziehung. Zudem wirken die verschiedenen Energiesysteme in unterschiedlicher Weise auf die öffentlichen Güter Klima und Umwelt ein. Daher müssen sowohl die Wechselwirkungen zwischen privaten und staatlichen Akteuren innerhalb der Energiemärkte als auch die Zusammenhänge zwischen den Energie- und anderen Märkten in die Überlegungen mit einbezogen werden. Zu fragen ist, wie auf dieser Basis tragfähige institutionelle, strukturelle und prozessuale Lösungen entwickelt werden können, die die Ziele Versorgungssicherheit, Umwelt- und Klimaverträglichkeit sowie Sozialverträglichkeit bestmöglich vereinbaren.

Vordringlich müssen die **Wechselwirkungen zwischen Markt, Staat und Zivilgesellschaft** in Bezug auf Energiesysteme erforscht werden. Dabei geht es um einen interdisziplinären Ansatz, bei dem Fragen der Effizienz von Institutionen mit Aspekten der politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen sowie mit Wirkungsanalysen der Marktinteraktionen vernetzt werden müssen. Dieses Zusammenspiel von institutionellen Regelungen und politisch wirksamen Handlungen muss einerseits besser verstanden, gleichzeitig aber auch auf weitere Optimierungsmöglichkeiten hin untersucht werden. Es gilt, institutionelle Arrangements und Regulierungen so auszugestalten, dass die sich zum Teil widersprechenden Ziele der Versorgungssicherheit, der Umwelt- und Klimaverträglichkeit und der Sozialverträglichkeit im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung bestmöglich erreicht werden können. Analyse wie Optimierung sind auf Ergebnisse aus der **ökonomischen, rechtlichen und sozialwissenschaftlichen Forschung** angewiesen. Bei den Optimierungsfragen ist es zudem dringend geboten, ethische Aspekte stärker zu berücksichtigen.

Technikfolgenabschätzung und Risikoanalyse

Energiepolitik wirkt großräumig oder sogar global und über lange Zeitperioden. Die Wechselwirkungen zwischen regionalen, nationalen, europäischen und internationalen energiepolitischen Rahmenbedingungen sind dabei ebenso wichtig wie die energierelevanten Entscheidungen und Maßnahmen von Individuen, Organisationen und Regierungen im interkulturellen Raum. Entscheidend für Planungsvorgänge in der Energiepolitik ist daher, dass die möglichen Nebenwirkungen und Risiken sowohl der eingesetzten Technologien wie auch der Steuerungsmaßnahmen (etwa Cap and Trade Systeme) im Voraus abgeschätzt und bewertet werden können.

Deutschland war und ist international Vorreiter in der Risiko- und Technikfolgenforschung. Die zentralen Fragen der Erfassung der Nebenwirkungen und Risiken gehen weit über die Aspekte einzelner Energietechniken und einzelner Steuerungsmaßnahmen hinaus. Sie sind wesentlich durch den Systemcharakter der Energiefrage geprägt. Die Methoden- und Modellentwicklung zur Analyse von Energiesystemen haben inzwischen einen hohen und auch international anerkannten Stand erreicht. Defizite bestehen allerdings in der Anwendung der verfügbaren Methoden, Modelle und Instrumente der Technikfolgenforschung auf die Abschätzung der zu erwartenden Konsequen-

zen von komplexen Maßnahmenbündeln im Kontext von divergierenden Zielen und Interessen.

Daher gilt es, die Kapazitäten in Deutschland zu einer methodisch abgesicherten und **transdisziplinären Technikfolgenforschung** so auszubauen, dass sie Entscheidungsträger aus Energiewirtschaft und -politik durch wissenschaftlich fundierte Analysen zu Chancen und Risiken der diskutierten Handlungsoptionen bestmöglich unterstützt. Dazu sollten auch die Methoden der **Energiesystemmodellierung** so weiter entwickelt werden, dass sie die für die Integration neuer Energietechniken strukturellen Systemanpassungen ebenso wie Unsicherheiten erfassen. Nur so lassen sich ihre Chancen, Risiken und Nebenwirkungen quantitativ beziffern und damit einer Bewertung zugänglich machen.

Weiterhin sind für die Bewertung von Maßnahmen und Technologien die Implikationen des Energiegesetzes und die Ergebnisse partizipativer Entscheidungsfindungsverfahren einzubeziehen. Dies gilt vor allem im Hinblick auf die Folgen für die Wirtschafts-, Umwelt- und Sozialverträglichkeit sowie für eine gerechte und faire Verteilung von Risiken und Chancen im nationalen wie internationalen Kontext. Risk Governance-Strukturen und internationale, kollektiv verbindliche Risk Governance-Standards sind ebenfalls wichtige Forschungsthemen in diesem Zusammenhang.

V Leitlinien für eine integrative Energieforschung

Grundsätzliche strukturelle Anforderungen

Innovative Energieforschung ist die Basis für eine wirtschaftliche, nachhaltige und sozialverträgliche Energieversorgung. Sie muss langfristig und nachhaltig konzipiert sein und den schwer vorhersehbaren zukünftigen Anforderungen von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gerecht werden. Hierbei müssen die Zeiträume, in denen sich eine erwünschte Veränderung der Energielandschaft einstellen kann, bei allen Maßnahmen antizipiert werden. Die erforderliche Vorsorge in der Energiepolitik ist dabei auf Forschungsleistungen aus Wirtschaft, Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen angewiesen. Dies bedingt eine enge Zusammenarbeit zwischen öffentlich und privat finanzierter Energieforschung als Kernbestandteil gemeinsamer Zukunftsvorsorge. Da die Aufgabe langfristig ist und nur durch fortwährende wissenschaftliche Arbeit bewältigt werden kann, muss auch die Förderung hohe Kontinuität aufweisen.

Der politische Stellenwert der Energieforschung sollte der Bedeutung entsprechen, den die Struktur unseres zukünftigen Energiesystems für die Zukunft Deutschlands und auch der Welt hat. Mangelnde Vorsorge in diesem Bereich kann fatale Folgen für künftige Generationen nach sich ziehen. Daher ist die Lösung der Energiefrage eine existentielle Aufgabe unserer Gesellschaften. Ein solch hoher Stellenwert muss konsequenterweise auch in einer **angemessenen Ressourcenausstattung** sowie **effektiven Koordinations- und Abstimmungsinstrumenten** zum Ausdruck kommen.

Die in den vorigen Kapiteln dargestellten Erfordernisse, die No Regret-Maßnahmen und weitere Forschungsaktivitäten, wie sie in den Modulen und den Querschnittsthemen formuliert sind, bedürfen einer **ihrer Bedeutung entsprechenden**

öffentlichen Förderung. Durch die Wissenschaft kann die Größe der Aufgabe dokumentiert werden – so wie es hier geschehen ist. Die Politik gewichtet diese dann in Relation zu anderen öffentlichen Aufgaben und nimmt entsprechende Weichenstellungen vor. Hier scheint den Akademien eine Neubewertung erforderlich.

Die Politik muss die Forschung mit Entschiedenheit darin unterstützen, neue Wege zu gehen, um der Gesellschaft eine nachhaltige und CO₂-arme Energiezukunft zu ermöglichen. Um die Forschung aus den Dilemmata der Energiepolitik zwischen kurzfristiger Erfolgsorientierung und langfristig orientierter Zukunftsvorsorge zu befreien, müssen Akteure in Forschung und Politik noch besser zusammenarbeiten.

Die Struktur der Energieforschung in Deutschland ist immer noch stark fragmentiert. Daran hat auch eine Reihe von neuen Ansätzen für eine vernetzte Forschungslandschaft sowie bundesweite Programme für interdisziplinäre Energieforschung nichts geändert. Die Vielfalt der international anerkannten disziplinären Forschung stellt ohne Frage ein großes Potenzial dar: Die OECD-Patentdatenbank sieht Deutschland im Bereich der Energietechnik erneuerbarer Energien im Jahr 2008 in einer Spitzenposition. Allerdings arbeiten die einzelnen Forschungsbereiche und -einrichtungen weitgehend unabhängig voneinander. Der fachübergreifende Austausch ist zu wenig ausgeprägt. Durch mangelnde Koordination kommt es zu ineffektiver Doppelforschung und Synergien bleiben ungenutzt. Die für die Zusammenarbeit zwischen technisch-naturwissenschaftlicher und wirtschafts-, rechts- geistes- und gesellschaftswissenschaftlicher Energieforschung notwendige Vernetzung ist kaum entwickelt. Das liegt zum einen an der starken Fragmentierung der verschiedenen Sektoren der universitären und der



außeruniversitären Forschung. Zum anderen ist es auf die traditionell disziplinär ausgerichtete Hochschulstruktur zurückzuführen, in der fakultätsübergreifende Forschung zwar verbal gefordert, aber in der Praxis zu wenig umgesetzt wird. Auch hat die Forschung immer noch einen vorwiegend nationalen und, wenn international, stark auf Europa ausgerichteten Fokus. Der Anschluss an die internationale Forschung und Technologieentwicklung muss daher verbessert werden. Dies gilt besonders im Hinblick auf Länder wie Russland, China oder Indien, von denen eine globale Lösung der Energiefrage entscheidend abhängen wird.

Die Kooperation zwischen universitärer bzw. außeruniversitärer Forschung und Industrieforschung muss verbessert werden. Energieforschung sollte zudem stärker an internationalen Gesichtspunkten orientiert und grenzüberschreitend organisiert sein. Selbst für die Europäische Energieforschung gibt es heute in Deutschland keinen zentralen Ansprechpartner. Die Bundesrepublik Deutschland benötigt dringend ein Gremium, das die organisatorische Bündelung der Energieforschung in Deutschland koordiniert und institutionelle Strukturen für eine integrative, grenzüberschreitende Energieforschung schafft.

Handlungsempfehlungen

Die Einrichtung von energiebezogenen **Kompetenzzentren** wird empfohlen. Solche Kompetenzzentren sollten aus einem Netzwerk von thematisch zusammenarbeitenden Forschungsgruppen verschiedener Universitäten und außeruniversitärer Einrichtungen, sowie potenziellen Anwendern (etwa Politik, Verbände, Industrie) bestehen. Dabei können sowohl technisch-naturwissenschaftliche wie wirtschafts- und gesellschaftswissenschaftliche Fragestellungen behandelt werden. Vorrangig geht es aber um die Verknüpfung aller Disziplinen, die zum Verständnis und zur Lösung eines Energieproblems benötigt werden. Die einzelnen Arbeitsgruppen können auf mehrere, örtlich getrennte Institutionen verteilt sein, die Kompetenzzentren sollten auf eine Dauer von deutlich mehr als fünf Jahren angelegt sein, um stabile Strukturen zu schaffen und die Kontinuität der Arbeit zu gewährleisten. Ein ähnliches Modell wird derzeit in

den USA mit dem Energy Frontier Research Center (EFRC) realisiert.

PPP-Modelle (public-private partnerships) für technologiebezogene, paritätisch **vom Staat und von der Privatwirtschaft finanzierte Forschungsverbände** könnten einen Rahmen dafür bereitstellen, neue Energietechnologien unter Praxisbedingungen auf einer wissenschaftlichen Basis zu testen und zu einer wirtschaftlich arbeitenden Pilotanlage weiter zu entwickeln. Beispiele für mögliche Projekte sind Verbände für die Forschung zu Off-Shore Windanlagen oder CCS-Pilotanlagen, vergleichbar mit dem Energy Technologies Institute (ETI) in Großbritannien.

Für eine kontinuierliche, interdisziplinäre und systematische Arbeit auf dem Feld der Energieforschung könnte neben den oben angesprochenen Kompetenzzentren und Forschungsverbänden auch die Bildung eines oder mehrerer großer Forschungszentren sinnvoll sein. Ob dies tatsächlich nötig und möglich ist, sollen weiterführende konzeptionelle Planungen ergeben. Dabei müsste auch geprüft werden, ob und wie solche Zentren aus bestehenden Elementen der deutschen Forschungslandschaft heraus entwickelt werden können. In solchen Strukturen sollten alle Aspekte der Energieforschung, von den Technikwissenschaften über die Naturwissenschaften bis hin zu den Sozial- und Geisteswissenschaften, vereint werden. Es müsste dabei gewährleistet werden, dass Technologien durch Forschung und Entwicklung bis zur Marktreife betreut werden können. Die Finanzierung müsste langfristig gesichert sein. Ein solches Zentrum sollte strukturell und finanziell beispielsweise in der Lage sein, ein Versuchs-Windenergiefeld, eine Pilotanlage für eine neuartige Form der Energiespeicherung oder eine CCS-Anlage aufzubauen und zu betreiben. Wegen der Bedeutung der wissenschaftlichen Ausbildung des Nachwuchses muss Wert auf eine enge Anbindung an universitäre Forschung und Lehre, beispielsweise an ein universitäres Exzellenzzentrum, gelegt werden.

Bund und Länder können neben den genannten Strukturen **inneruniversitäre Forschungsverbände** fördern. Solche Verbände sind auf min-

destens drei Jahre angelegte Zweckbündnisse zwischen mindestens drei Fachbereichen, Fakultäten oder entsprechenden Einheiten innerhalb einer Universität (Modell der Polyprojekte an der ETH Zürich). Dabei geht es nicht unbedingt um Vollständigkeit bei einer Problembearbeitung, sondern vielmehr um die konkrete Kooperation zwischen Hochschullehrern unterschiedlicher Disziplinen innerhalb einer Universität. Ziele sind zum einen die Verbesserung der interdisziplinären Zusammenarbeit und zum anderen die Einrichtung eines fachübergreifenden Forschungsteams, das sich nach Abschluss des Projektes weitere Drittmittel erschließen kann.

Empfehlungen für die staatliche Forschungsförderung

Den eingangs dargestellten Anforderungen an eine innovative Energiepolitik sollte auch in der staatlichen Forschungsförderung Rechnung getragen werden. Die Art und Weise, in der Energie umgewandelt und genutzt wird, grundlegend zu verändern, erfordert zusätzliche Forschungsanstrengungen über unter Umständen mehrere Jahrzehnte mit großen Investitionen in die Grundlagenforschung. Es wird dabei empfohlen, nicht einfach die ressortgebundene Forschung weiter auszubauen, sondern den Ausbau mit einer Koordination der FuE-Aktivitäten der einzelnen Ressorts zu verbinden.

Dabei ist es unerlässlich, vor allem die systemische Perspektive zu fördern. Nur so wird Forschung zu langfristig wirksamen Fortschritten in der Sicherstellung unserer zukünftigen Energieversorgung führen. Dies sollte aber nicht dahingehend missverstanden werden, dass bereits jedes einzelne Projekt in interdisziplinärer Kooperation erfolgen muss. Die Entwicklung eines neuen Elektrodenmaterials für ein Batteriesystem etwa bleibt letztlich eine naturwissenschaftliche Fragestellung. Ebenso ist die Frage der Wirksamkeit eines ökonomischen Anreizes im Wesentlichen eine Aufgabe der Wirtschafts- und Gesellschaftswissenschaften. Doch erst, wenn das Wissen der unterschiedlichen Fächer als integrative Einheit gesehen und in den einzelnen Forschungsleistungen aufeinander bezogen wird, haben wir die Chance, den Her-

ausforderungen der künftigen Energieversorgung angemessen zu begegnen. Für das oben genannte Beispiel des Batteriesystems bedeutet dies, dass es nur dann sinnvoll ist, das Elektrodenmaterial für Anwendungen in einem Energiesystem zu entwickeln, wenn die benötigten Rohstoffe in genügend großer Menge verfügbar sind, das Material auf der Ebene der Systemintegration in der Batterie eingesetzt werden und der Typ Batterie, für den es geeignet ist, sinnvoll in ein Energiesystem integriert werden kann.

Im Einzelnen wird empfohlen:

Langfristig ausgerichtete Koordination der FuE Aktivitäten, eine Energieforschungs-politik aus einem Guss

Derzeit wird die Energieforschung von sechs Bundes- und zahlreichen Landesministerien sowie von DFG, VW-Stiftung und privaten Stiftungen gefördert, ohne dass eine ausreichende Abstimmung oder gar eine gemeinsame Koordination stattfindet. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Kohärenz wäre ein Modell, in dem die FuE-Mittel der verschiedenen Ressorts von einem **gemeinsamen Lenkungsausschuss** unter Beteiligung von allen sechs Ressorts und hochrangigen Vertretern aus Wissenschaft und Wirtschaft unter forschungsstrategischen Gesichtspunkten koordiniert werden (Ein solches Modell ist in Baden-Württemberg mit dem Programm BW+ erfolgreich verwirklicht worden. Die gesamte Ressortforschung im Bereich Umwelt wird gemeinsam in einem Lenkungsgremium, in dem vier Ministerien vertreten sind, abgestimmt). Alternativ könnten zumindest die bislang aufgefächerten Zuständigkeiten des Bundes **künftig in einem Ressort** zusammengeführt werden. Bis eine dieser Optionen umgesetzt ist, sollte zumindest ein mit Richtlinienkompetenz ausgestatteter Koordinationskreis geschaffen werden. Ein solcher Ausschuss könnte auch zu einem **„Deutschen Energieforschungsrat“** ausgeweitet und aufgewertet werden, der nicht nur die genannte Aufgabe übernimmt, sondern auch die internationale Vernetzung koordiniert und die Bundesregierung berät. Zudem könnte er die notwendige Balance zwischen fokussierten Projekten und starker systemischer Integration gewährleisten.



Überprüfung der öffentlichen FuE-Budgets

Die bisherige Allokation des Budgets für öffentliche FuE sollte kritisch überprüft werden. Bessere Abstimmungen zwischen den einzelnen Bundesministerien und zwischen Bundes- und Landesministerien erscheinen dringend geboten. Vor allem sind die in den No Regret-Maßnahmen und in der Diskussion der Module und Querschnittsthemen benannten Themen vorrangig zu bearbeiten. Dies schließt ausdrücklich die Förderung integrativer Ansätze der Sozial-, Wirtschafts-, Rechts- und Geisteswissenschaften ein.

Angemessene Begutachtungs- und Bewilligungsverfahren

Die Bewilligungsprozesse sind so weiter zu entwickeln, dass sie innovative, High Risk – High Reward Forschung fördern. Die Begutachtungsverfahren sollten durch eine interdisziplinäre (bei nicht rein fachwissenschaftlichen Fragestellungen) und internationale Zusammensetzung der Gremien die wissenschaftliche Qualität der Forschung sichern und ihre internationale Ausrichtung stärken.

Bündelung und Fokussierung der Auftragsforschung

Es wird weiterhin unerlässlich sein, Forschungsfragen der einzelnen Ressorts durch gezielte Aufträge bearbeiten zu lassen. Die Zahl dieser Direktvergaben sollte in der Tendenz eher abnehmen und durch innovative Methoden der Forschungsförderung, wie sie in diesem Abschnitt skizziert sind, ersetzt werden.

Auflage integrativer Förderprogramme

Thematische Ausschreibungen sollten je nach Thematik technische, naturwissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Aspekte umfassen und auf integrative, interdisziplinäre Forschung ausgerichtet sein. Dazu sollte die bereits heute breit gefächerte naturwissenschaftliche und technikkwissenschaftliche Forschungsförderung dahingehend ergänzt werden, dass die Wahrscheinlichkeit einer Bewilligung steigt bzw. zusätzliche Mittel bereitgestellt werden, wenn in kompetenter und pro-

blemgerechter Form wirtschafts-, sozialwissenschaftliche, rechts- oder geisteswissenschaftliche Fragestellungen in das Projekt integriert werden.

Kapazitäten für die Nachwuchsförderung

Die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ist von essentieller Bedeutung für die Zukunft der Energieforschung und für die Innovationskraft des Standorts Deutschland. Eine zukunftsorientierte systematische und langfristige Nachwuchsförderung ist unerlässlich. Der Transfer von Wissen in Industrie, Politik und Verwaltung kann nur durch „lebenslanges Lernen“ in Form von Fortbildungen geschehen. Sowohl bei der Nachwuchsförderung als auch bei der postgradualen Weiterbildung muss man allerdings große Defizite konstatieren. So gibt es nicht genügend Berufsmöglichkeiten in Energieunternehmen für Absolventen aus der Grundlagenforschung im Bereich erneuerbarer Energien, Speicherung, innovativer Antriebssysteme oder effizienzorientierter Infrastruktur. Ein anderes wichtiges Beispiel ist der sehr relevante Kompetenzerhalt in der Reaktorsicherheits- und Endlagerungsforschung. Nur durch einen breit angelegten Aufbau von geeigneten Strukturen lassen sich die „Humanressourcen“ erhalten und ausbauen, die für einen gelingenden Übergang in ein post-fossiles Energiesystem notwendig sind.

Reformen in der Lehre

Die Notwendigkeit interdisziplinärer Energieforschung erfordert eine Umstrukturierung der Lehre. Neue grundständige energie-spezifische Studiengänge sind aber wenig zweckmäßig, weil sie auf Kosten der disziplinären Grundlagenausbildung gehen, kaum wirklich breit in allen Fächern der Energieforschung ausbilden können und so die Gefahr des Dilettantismus in sich bergen. An ausgewiesenen Universitäten sollten vielmehr Aufbaustudiengänge eingerichtet werden, die fertigen Naturwissenschaftlern und Ingenieuren die gesellschaftswissenschaftliche Aspekte und fertigen Sozial- und Geisteswissenschaftlern die naturwissenschaftlichen und technischen Inhalte vermitteln. Darüber hinaus erscheint es angebracht, die bestehenden Studiengänge daraufhin zu über-

V LEITLINIEN

prüfen, ob nicht im Grundstudium im Sinne eines Studium Generale Grundperspektiven der anderen wissenschaftlichen Denkrichtungen vermittelt werden könnten, um die spätere Zusammenarbeit von interdisziplinär besetzten Arbeitsteams zu erleichtern. Kooperationen mit der Energiewirtschaft könnten die Ausbildung praxisnäher machen. Diese Veränderungen können nur von den Universitäten initiiert und gemeinsam mit den Ländern umgesetzt werden. Der Bund kann aber über geeignete Anreize diese Entwicklung unterstützen.

Postgraduale Weiterbildung

Die Einrichtung von Graduiertenkollegs zu Energiefragen sollte geprüft werden. Die Universitäten als Basis der Ausbildung (inkl. der Promotion) und ihre Attraktivität für Studierende sollten gestärkt werden – oft wird dies bereits durch offensivere Vermarktung des Themas Energie, sowohl als Schwerpunkt des Studiums als auch als Forschungsthema, erreicht. Verbessert werden sollte aber auch die Zusammenarbeit in der Doktorandenausbildung zwischen Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen

(einschließlich der Industrieforschung). Modelle könnten Internationale Max-Planck-Research oder Helmholtz Graduate Schools sein, die Promotionsvorhaben thematisch verzahnen und eine enge Zusammenarbeit der Promovierenden und ihrer Betreuer an verschiedenen Einrichtungen gewährleisten.

Praxisorientierte Fortbildungsangebote

Um den Wissens- und Kompetenztransfer im Energiebereich zu stärken, sollte die Weiterbildung in technisch-naturwissenschaftlichen Bereichen für Entscheidungsträger in Politik, Verwaltung und Industrie zum Standard werden. In den Weiterbildungsangeboten könnten Technik- und Naturwissenschaften, Wirtschafts- und Rechts-, Sozial- und Politikwissenschaften verknüpft werden. Der erweiterte Blick von Entscheidungsträgern könnte helfen, neue Entwicklungen bei Energiedienstleistungen, Energieeffizienz und in der Umsetzung der Emissionsziele anzustoßen. Beispiele sind Masterprogramme, Sommerschulen und berufsbegleitende Aufbaukurse für Entscheidungsträger in Politik, Wirtschaft und Verwaltung.

VI Ausblick

Die vorstehende Darstellung identifiziert in komprimierter Form wichtige Forschungsfelder, die in der Energieforschung prioritär behandelt werden sollten, um die Herausforderungen zu bewältigen, die bei der unvermeidlichen Umstellung unseres Energiesystems auf Wirtschaft und Gesellschaft zukommen. Hierbei gibt es einige Themen, die in jedem Falle bearbeitet werden müssen, unabhängig von politisch-gesellschaftlichen Randbedingungen. Bei anderen Themen gibt es gewisse Spielräume hinsichtlich der Forschungsprioritäten, abhängig von den Vorstellungen darüber, wie unser Energiesystem gestaltet werden und auf welchen Energiequellen es primär beruhen soll.

Beide Elemente zusammen vermitteln jeweils das Bild einer bestimmten Energiezukunft. Energiepolitische Entscheidungen haben typischerweise sehr langfristige Auswirkungen – allein die Betriebsdauern energietechnischer Anlagen übertreffen die Dauer einer Legislaturperiode um das Fünf- bis Zehnfache. Aus diesem Grunde darf die Forschung nicht auf nur eine solche Energiezukunft verengt werden, sondern muss **mehrere parallele Handlungsoptionen für Politik und Gesellschaft** eröffnen. Damit muss sie in Kontinuität auch solche Richtungen verfolgen, die jeweils nicht im Fokus der politischen Diskussion liegen, aber für die Zukunft bedeutsam sein könnten.

Die Grundaussagen dieses Berichts ergeben sich aus den dargelegten Fakten, Begründungen und umfassenden Hintergrundinformationen. Allerdings sind nicht für alle Aussagen detaillierte Begründungszusammenhänge und die unterstützenden Daten angegeben – dies war im Zeitraum zwischen Auftrag (Herbst 2008) und Fertigstellung des Berichts (Juni 2009) nicht möglich. Ein großer Teil der Daten liegt aber vor. Die Priorisierung bestimmter Forschungsthemen ist in Form ausführlicher Technologieberichte und Handlungsfeldberichte, die von Experten in ihren jeweiligen Feldern verfasst worden sind, durch detaillierte Begründungen gestützt. Da diese Informationen von hohem Wert für Leser dieses Berichts sein könnten, ist geplant, bis Mitte 2010 eine wesentlich umfangreichere und umfassendere Studie zu erstellen. Diese wird in den Kernaussagen dem vorliegenden Bericht entsprechen, aber stärker ins Detail gehen und weitergehende Begründungen liefern.

Die Autoren hoffen, dass die beiden Studien zusammen eine fundierte Basis für die Formulierung und Strukturierung eines Energieforschungsprogramms für die nächsten Jahre – vielleicht sogar Jahrzehnte – bilden.

Autoren und Mitwirkende

Für den Text dieses Energieforschungskonzepts sind ausschließlich die Koordinatoren verantwortlich. Die Akademien tragen die Aussagen des Papiers. In den Akademien ist das Konzept durch vorher nicht involvierte Kollegen, die wertvolle weitere Anregungen gegeben haben, begutachtet worden. Die anderen im Folgenden genannten Personen und Organisationen haben durch Expertisen, Stellungnahmen und Beratung die Koordinatoren unterstützt, nicht aber den gesamten Text gelesen und autorisiert.

Die Autoren danken allen, die an der Erstellung des Konzepts beteiligt waren, für ihre Unterstützung.

Koordinatoren

Prof. Dr. Frank Behrendt	Institut für Energietechnik, TU Berlin
Prof. Dr. Ortwin Renn	Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie, Universität Stuttgart
Prof. Dr. Ferdi Schüth	Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim/Ruhr
Prof. Dr. Eberhard Umbach	Forschungszentrum Karlsruhe

Mitarbeiter der Koordinatoren

Dr. Florian Ausfelder	DECHEMA, Frankfurt/Main
Dr. Andreas Förster	DECHEMA, Frankfurt/Main
Dr. Justus Lentsch	BBAW, Berlin
Dr. Andreas Möller	acatech Hauptstadtbüro, Berlin
Dr. Christoph Schneider	Bonn
Dr. Gisela Wachinger	Stuttgart

Autoren von Beiträgen, Berichten zu Einzelthemen und Expertisen

Prof. Dr.-Ing. Dieter Ameling	ThyssenKrupp Steel AG, Oberhausen
Dr. Michael Bäcker	Zenergy Power GmbH, Rheinbach
Prof. Dr. Marc Oliver Bettzüge	Staatswissenschaftliches Seminar, Universität zu Köln
Prof. Dr. Frank Biermann	Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit Amsterdam
Prof. Dr.-Ing. Rainer Bitsch	Institut für Energietechnik, BTU Cottbus
Prof. Dr. Monika Böhm	Institut für Öffentliches Recht, Philipps-Universität Marburg
Dr. Harald Böttner	Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg
Prof. Dr. Gerhard Bohrmann	Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen
Prof. Dr. Alexander Bradshaw	Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching
Dr. Christian Draheim	RWE Innogy GmbH, Essen
Dr.-Ing. Harald Drück	Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen, Universität Stuttgart
Prof. Dr. Ottmar Edenhofer	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
Prof. Dr. Rolf Emmermann	Deutsches GeoForschungsZentrum Potsdam

Prof. Dr. Georg Erdmann	Institut für Energietechnik, TU Berlin
Dr.-Ing. Peter Fritz	Forschungszentrum Karlsruhe
Prof. Dr. Horst Geckeis	Institut für Nukleare Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe
Dr. Michael Geiger	BASF SE, Ludwigshafen
Prof. Juri Grin	Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Dresden
Prof. Dr. Armin Grunwald	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Forschungszentrum Karlsruhe
Dr. Uwe Hermann	Corporate Technology, Siemens AG, Erlangen
Prof. Dr. Lutz Heuser	SAP AG, Walldorf
Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier	Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin
Dr. Horst Hüners	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln
Prof. Dr. Reinhard Hüttl	Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam
Prof. Dr. Carlo Jäger	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Potsdam
Prof. Dr. Helmut Jungermann	Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaften, TU Berlin
Prof. Dr.-Ing. Alfons Kather	Institut für Energietechnik, TU Hamburg-Harburg
Prof. Dr. Gernot Klepper	Institut für Weltwirtschaft, Kiel
Dr.-Ing. Joachim Knebel	Institut für Reaktorsicherheit, Forschungszentrum Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat	Institut für Hochspannungstechnik, TU Braunschweig
Prof. Dr. Claus Leggewie	Kulturwissenschaftliches Institut Essen
Prof. Dr. Karl Leo	Institut für Angewandte Physik, TU Dresden
Prof. Dr. Franz Makeschin	Institut für Bodenkunde und Standortlehre, TU Dresden
Prof. Dr. Dirk Messner	Deutsches Institut für Entwicklungspolitik, Bonn
Dr. Bernhard Milow	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln
Dr. Matthias Müller-Mienack	Vattenfall Europe Transmission GmbH, Berlin
Prof. Dr. Hans Müller-Steinhagen	Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Stuttgart
Prof. Dr. Julian Nida-Rümelin	Geschwister-Scholl-Institut für Politische Wissenschaft, LMU München
Prof. Dr. Kornelius Nielsch	Institut für Angewandte Physik, Universität Hamburg
Dr. Zoltán Nochtá	SAP Research CEC, Karlsruhe
Dr. Thai Lai Pham	Sector Healthcare and Corporate Technology, Siemens, Erlangen
Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger	Institut für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen
Prof. Dr. Robert Pitz-Paal	Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart
Dr. Werner Prusseit	THEVA Dünnschichttechnik GmbH, Ismaning
Prof. Dr. Joachim Radkau	Fakultät für Geschichtswissenschaft, Philosophie und Theologie, Universität Bielefeld
Prof. Dr. Bernd Rech	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
Prof. Dr. Eckard Reh binder	Institut für Wirtschafts-, Umweltrecht und Rechtsvergleichung, Universität Frankfurt
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz	Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dortmund

ANHANG

Prof. Dr. Lucia Reisch	Copenhagen Business School, Kopenhagen
Prof. Dr. Horst Rueter	Geothermische Vereinigung, Geeste
Dr. Bernd Rumpf	BASF SE, Ludwigshafen
Prof. Dr. Günter Scheffknecht	Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart
Dr. Kerstin Schierle-Arndt	BASF SE, Ludwigshafen
Prof. Dr. Eberhard Schmidt-Aßmann	Institut für Deutsches und Europäisches Verwaltungsrecht, Universität Heidelberg
Prof. Dr. Jens-Peter Schneider	European Legal Studies Institute, Universität Osnabrück
Prof. Dr. Hans-Werner Schock	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
Prof. Dr. Miranda Schreurs	Forschungsstelle für Umweltpolitik, FU Berlin
Prof. Dr. Thomas Schulenberg	Institut für Kern- und Energietechnik, Forschungszentrum Karlsruhe
Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz	Lehrstuhl für Energieverteilung und Hochspannungstechnik, BTU Cottbus
Prof. Dr. Arndt Simon	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart
Prof. Dr. Martin Strohrmann	BASF SE, Ludwigshafen
Dr. Rainer Tamme	Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart
Dr.-Ing. Walter Tromm	Nukleare Sicherheitsforschung, Forschungszentrum Karlsruhe
Dr. Christian Urbanke	Corporate Technology, Siemens AG, Erlangen
Prof. Dr.-Ing. Frank Vogdt	Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin
Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß	Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart
Dr. Kurt Wagemann	DECHEMA, Frankfurt/Main
Prof. Dr.-Ing. Harald Weber	Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Universität Rostock
Prof. Dr. Eicke Weber	Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, Freiburg
Prof. Dr. Dieter Wegener	Industry & Solutions, Siemens AG, Erlangen
Prof. Dr. Carl Christian von Weizsäcker	Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern, Bonn
Prof. Dr. Lutz Wicke	Institut für Umweltmanagement, Europäische Wirtschafts- hochschule, Campus Berlin
Prof. Dr. Martin Winter	Institut für Physikalische Chemie, Universität Münster
Prof. Dr. Michael Zürn	Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

Schriftliche Stellungnahmen im Rahmen der Konsultation

Bundesverband Erneuerbare Energien

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie

Deutsche Physikalische Gesellschaft

Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

Gesellschaft Deutscher Chemiker

Verband der Chemischen Industrie

Verein Deutscher Ingenieure

Verband Kommunaler Unternehmen

