

## 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 auch die 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 CO<sub>2</sub>-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 auf eine optimale Auswahl und Kopplung von Netz- und Speichertechnologien sowie auf Interaktionen mit den Markt-, Vertrags- und Rechtssystemen der beteiligten Staaten besonders zu achten.
- Bei den verschiedenen Nutzungsformen ist besonders die Forschung im Bereich der Mobilität geboten, da hier der Energieverbrauch weltweit kontinuierlich. 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.

## ZUSAMMENFASSUNG

■ Unabhängig von der Umsetzung von Technologien besteht aber auch die Notwendigkeit, das **grundlegende Verständnis von energieträgertragenden Prozessen** auf molekularer Ebene zu verbessern, insbesondere von Mehrlektronen-Transportprozessen, 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.

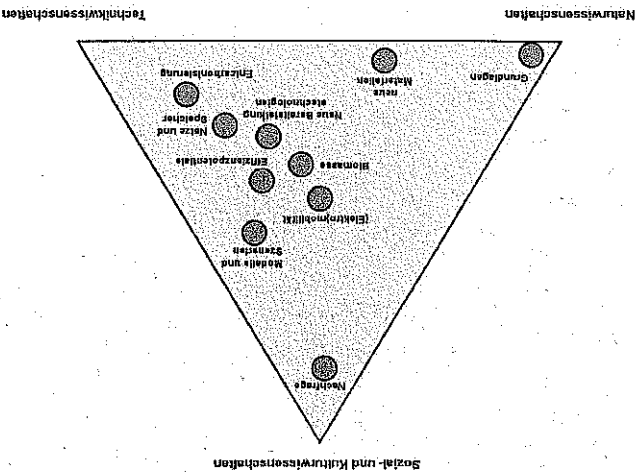
■ Die bisher erreichten Einsparungen im Energieverbrauch durch Verbesserungen der Effizienz wurden weltweit immer wieder durch den Mehrkonsum von Energiedienstleistungen in nahezu allen Ländern überkompensiert. Dem Thema **Nachfrage nach Energiedienstleistungen** sollte künftig wesentlich mehr Aufmerksamkeit 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**, unter Einbeziehung von Expertise aus unterschiedlichen Wissenschafts-

reihen, adäquat bearbeiten.

■ Fraunhofer-Instituten und in der Industrie durchgeführten, Großforschungszentren, in Max-Planck- und Energieforschung wird in Deutschland an Universitäts-

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, weil sich sonst die erforderliche systemische Sichtweise nicht durchsetzen wird.

Für eine kontinuierliche, interdisziplinäre und systemische Arbeit auf dem Feld der Energieforschung ist in Deutschland **mindestens ein großes Forschungszentrum** erforderlich, das großtechnische Vorhaben breit und multidisziplinär in Kooperation mit Industrie, Universitäten und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen durchführt. In einem solchen Zentrum, das idealerweise aus bestehenden Strukturen – etwa aus einem oder mehreren Helmholtz-Zentren – entwickelt würde, sollten alle Aspekte der Energieforschung, von den Technikwissenschaften über die Naturwissenschaften bis hin zu den Sozial- und Geisteswissenschaften, vereint werden. Ein derartiges Zentrum muss in der Lage sein, Technologien durch Forschung und Entwicklung bis zur Marktreife zu betreuen. Die Finanzierung muss 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 bei den 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 auch in einer Fragmentierung der Zuständigkeiten in der Forschungsförderung niederschlägt. Effiziente Energieforschung bedarf aber **klarer Zuständigkeiten**. Daher sollte ein mit Richtlinienkompetenz ausgestatteten gemeinsamen 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.

# Einleitung

## Ausgangssituation

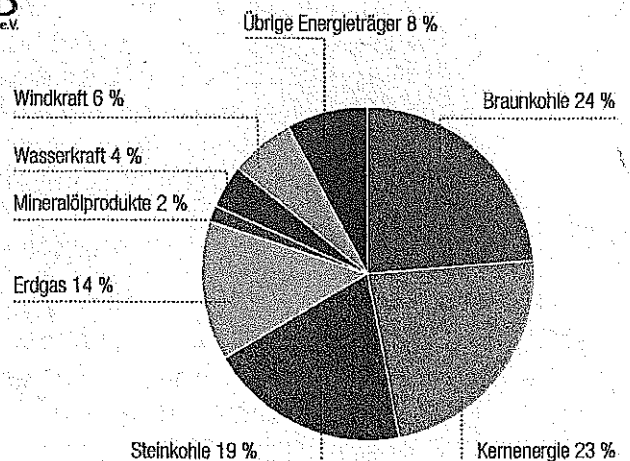
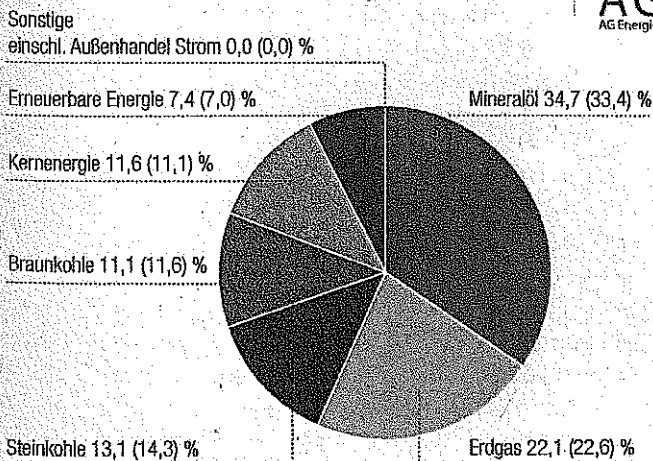
Innovative Forschung ist Deutschlands wichtigste Ressource und Basis für die Entwicklung realistischer Optionen zur Gestaltung der künftigen **Energieversorgung** im Spannungsfeld von **Klima- und Umweltschutz** auf der einen und **Versorgungssicherheit zu vertretbaren Kosten** auf der anderen Seite. 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 Klimaschutzzielen gehört zu den zentralen Herausforderungen der Gegenwart. Auf dem Kopenhagener 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 bzw. 2008 (Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.)

AGEB  
AG Energiebilanzen e.V.



## EINLEITUNG

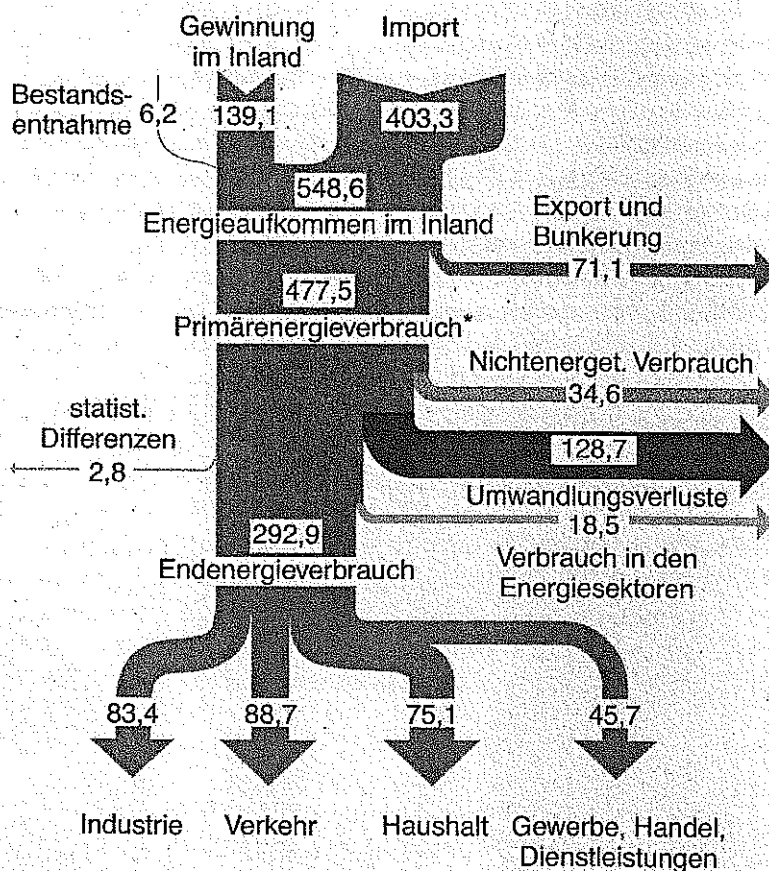
aus regenerativen Energiequellen. Gleichzeitig werden die 2020-Klimaschutzziele mit hohem Druck verfolgt.

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 in 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