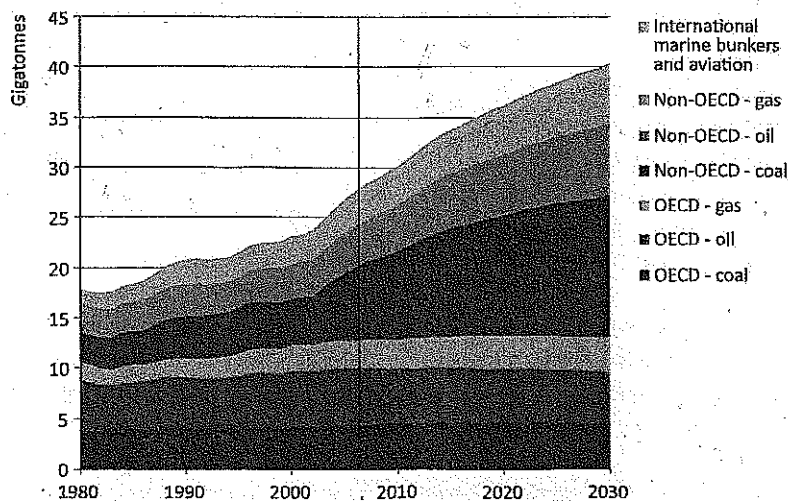
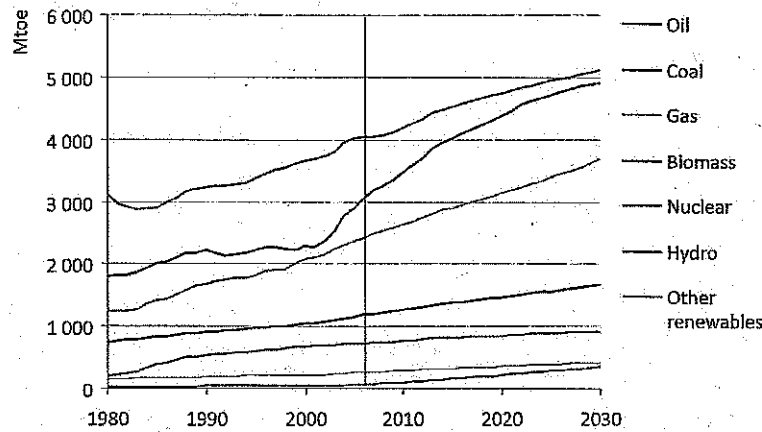


gend gering. Ihre Nutzung erfordert daher mehr Material, Flächen und Aufwand für die Bereitstellung der gewünschten Energiedienstleistung.

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 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, sodass sich der Verbrauch der 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 Effizienzerhöhung nicht mehr ohne erheblichen Aufwand kompensieren lassen. In den Nicht-OECD-Staaten eröffnen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung ein enormes Energieeinsparpotenzial, das bisher 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

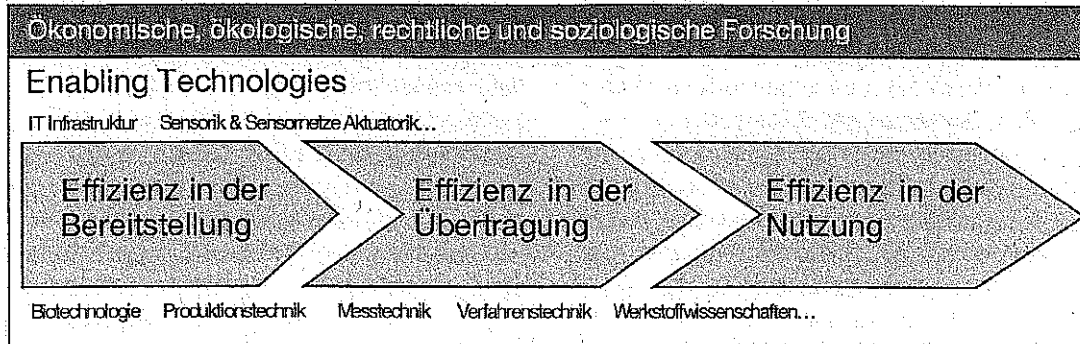


Abb. 7: Integrierte Sichtweise einer zukunftsweisenden Energieforschung.

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 mit 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 jedoch eine unabdingbare Voraussetzung 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, sowohl in

EINLEITUNG

Hinblick auf die gesamte Verfügbarkeit als auch hinsichtlich der geographischen 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 engeren 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 langfristige 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 erfolversprechende Lösung der Energieprobleme ohne die Erweiterung der Wissensbasis sowohl im technologisch-grundlagenwissenschaftlichen als auch im gesellschaftswissenschaftlichen Be-

reich 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 anzugehen, 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 günstigerer 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 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 die über die No Regret-Maßnahmen hinausgehenden 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,