

timierung 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 Bereich der **Werkstoff- und Materialwissenschaften** sowie der Verarbeitung aktueller 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 Brennstoffzellen 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 CO<sub>2</sub> nicht in die Atmosphäre einzubringen. Hierzu werden eine Reihe von verschiedenen Technologien diskutiert (die sog. **CCS-Technologien**, Carbon Dioxide Capture and Storage, Kohlenstoff/CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Speicherung), die sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden und alle noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufweisen. Alternativ sollten auch andere CO<sub>2</sub>-Senken zur Entfernung des CO<sub>2</sub> 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 es, die Verbrennung so zu betreiben, dass das entstehende CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-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, ebenso wie 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 Wäschern nachgerüstet werden, was ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist.

Eine weitere Technologie, die Teil einer Prozesskette zur Abtrennung und Speicherung von  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ -Anteil als in einem konventionell betriebenen Kraftwerk, das  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ , je nach geologischen Gegebenheiten, effizient mit der Förderung kombiniert werden, wobei das  $\text{CO}_2$  den Druck innerhalb der Lagerstätte erhöht und damit eine weitergehende Ausbeutung zulässt.

Im Gegensatz dazu ist die Speicherung von  $\text{CO}_2$  in salinen Formationen (tiefe, salzwasserführende Sedimentgesteine) nicht mit wirtschaftlichen Vorteilen verbunden. Allerdings ist die geschätzte Kapazität der salinen Formationen deutlich größer. Hierbei wird  $\text{CO}_2$  in die saline Schicht in Tiefen ab 800 m gepresst, wo es aufgrund der Temperatur- und Druckbedingungen überkritisch vorliegt. Zahlreiche Fragen zur **Stabilität des  $\text{CO}_2$ -Einschlusses**

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

Eine weitgehende Speicherung von  $\text{CO}_2$  hat Folgen, die über rein technische Aspekte hinausgehen. Neben Fragen der Risikoabschätzung stehen die zur Sicherheit und Überwachung der Lagerstätten, Aufbau einer Transportstruktur, Akzeptanz der Bevölkerung im Bereich der Lagerstätten, gegebenenfalls erhöhten Energiepreisen einschließlich der Auswirkung auf Verbraucher und die Wettbewerbsfähigkeit vor allen Dingen der energieintensiven Industrie. Auf der anderen Seite könnten sich durch die Entwicklung effizienter CCS-Technologien neue Exportmöglichkeiten für das Hochtechnologieland Deutschland eröffnen.

Neben einer Speicherung von  $\text{CO}_2$  ist auch eine **alternative Verwertung** im Sinne einer chemischen Umsetzung zu einem Produkt denkbar, wozu neue Synthesewege und Wertschöpfungsketten etabliert werden müssten. Das Mengenpotential der Verwertung ist im Vergleich zu den Emissionen vernachlässigbar. Allerdings könnte die mit ihrer Produktion verbundene Wertschöpfung einen Beitrag zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit der gesamten  $\text{CO}_2$ -Strategie führen, so dass im Sinne einer systemischen Betrachtung Ansätze für die stoffliche Verwertung durchaus sinnvoll sind.

Alternativ zur Abtrennung des  $\text{CO}_2$  sollten allerdings auch Konzepte exploriert werden, die über andere Verfahren der Atmosphäre äquivalente Mengen  $\text{CO}_2$  entziehen. Dies könnte durch Nutzung von Biomasse als  $\text{CO}_2$ -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,

diese müssten allerdings umfassend systemisch, auch unter ökonomischen und soziologischen Aspekten und in Hinblick auf Ihre Nachhaltigkeit analysiert werden. Auch ist für solche Ansätze zu analysieren, inwieweit die Nutzung von Biomasse als Kohlenstoffsenke die Produktion von Energie aus Biomasse durch Flächenkonkurrenz beeinträchtigt.

### Zusammenfassende Bewertung der Forschungsprioritäten auf dem Gebiet der Fossilen Energien

Die **Schlüsselfrage** in einem Energiesystem, das sich wesentlich auf fossile Energieträger stützt, mit dementsprechend höchster Forschungspriorität, ist die **Minderung der Nettoemissionen von CO<sub>2</sub>**. Forschungsanstrengungen sollten sich sowohl auf **Abscheide- und Lagertechnologien** bei der Verbrennung als auch auf **alternative CO<sub>2</sub>-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, CO<sub>2</sub> aus mobilen Quellen wie etwa Autos abzutrennen, ergibt sich auch in einem fossilen Energiesystem die Notwendigkeit, einen erheblichen Teil des Mobilitätsbedarfs elektrisch zu befriedigen, wobei die elektrische Energie fossil mit CCS erzeugt würde. **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 damit die prioritären Forschungsfelder für Arbeiten 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 Kernenergie, die nukleare 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. Dieser ergibt sich zum einen aus dem allgemeinen Interesse, die sehr hohen deutschen Sicherheitsstandards weiterzuentwickeln und in die Entwicklung, den Betrieb und den Bau künftiger Kernkraftwerke andernorts auf der Welt einfließen zu lassen, auch im nationalen Eigeninteresse.

Gleiches gilt für die **Endlagerforschung**, bei der außerdem das hohe 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;

## FORSCHUNGSPOTENZIALE

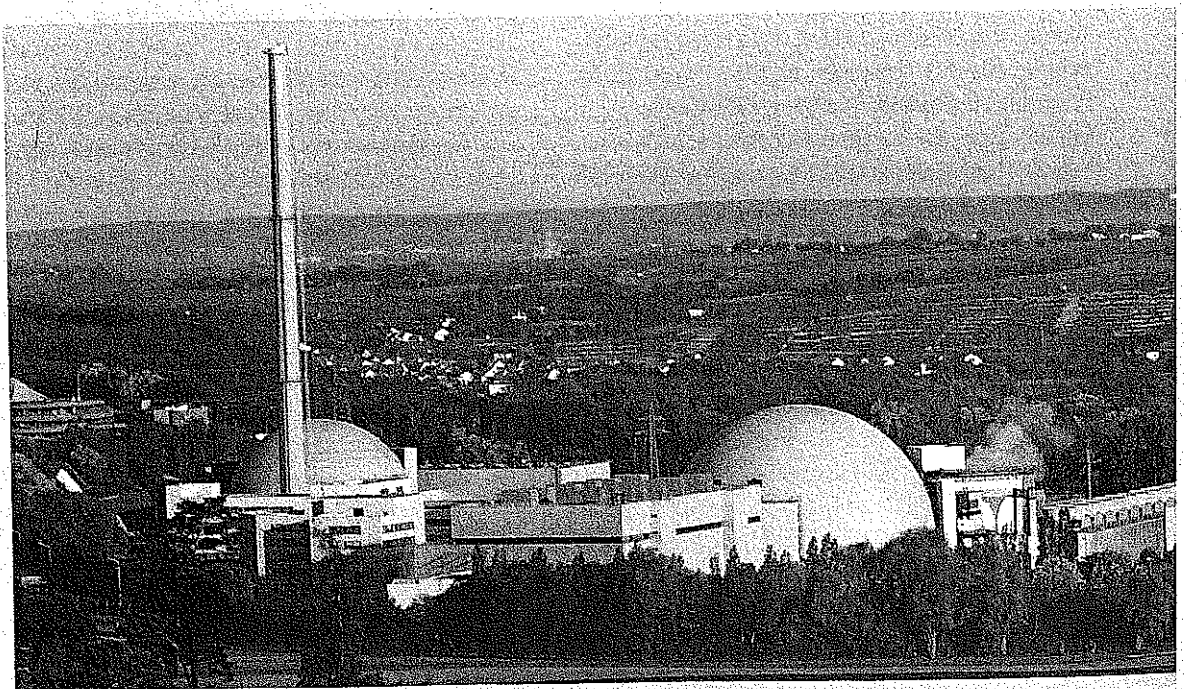
um einen erheblichen Teil des Energiebedarfs mit Kernenergie zu decken. Eine solche Entscheidung hätte Konsequenzen für die Energieforschung nicht nur im Bereich der Entwicklung der Nukleartechnologien selbst, sondern auch in Bezug auf die Einbettung in ein umfassendes Energiesystem mit allen technologischen 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 implementieren wollte, oder wenn sich in Deutschland im Verlauf der Zeit die Einsicht durchsetzen sollte, dass die Kernkraft trotz der unbestreitbaren Risiken eine kostengünstige und konsensfähige Grundlast-Stromversorgung ohne CO<sub>2</sub> 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 Ausnützung 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 werden 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



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)

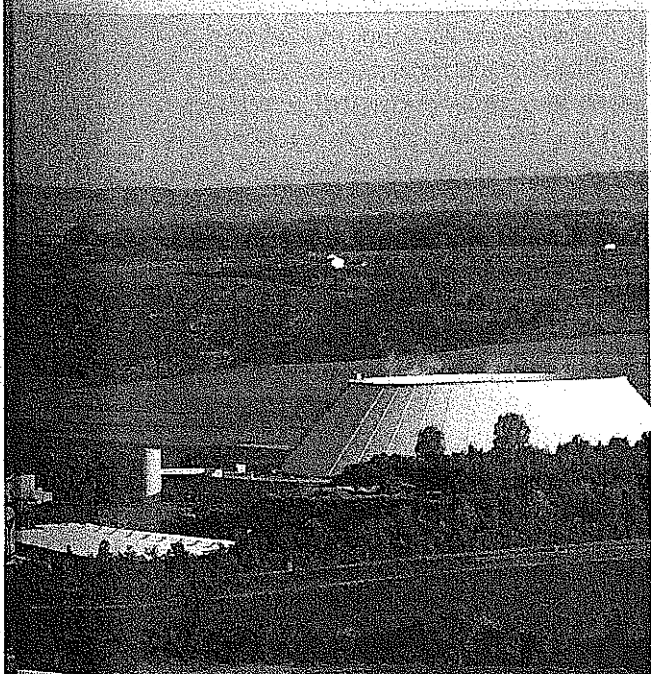


3. Generation, wie der EPR (Europäischer Druckwasserreaktor), basieren auf den Erfahrungen der heutigen Leichtwasserreaktoren und sind auf eine Betriebsdauer von mindestens 60 Jahren ausgelegt. Die **Sicherheitsforschung** für diese Reaktoren muss weiterhin Untersuchungen von Betriebstransienten, Auslegungsstörfällen, sowie 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 Aktiniden, 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 minorer Aktiniden 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 damit 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 ihre 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen im Kraftwerksbereich die Anforderungen an die Verringerung des Kohlendioxid ausstoßes

im Verkehrssektor weniger stringent wären – obwohl ebenfalls mittel- bis langfristig unumgänglich. Alternativ zum sehr starken Ausbau der Elektromobilität können Kernkraftwerke auch zur Erzeugung sowohl von elektrischer Energie als auch von **Hochtemperaturwärme** eingesetzt werden. Diese könnte zur Erzeugung anderer Energieträger, wie etwa Wasserstoff, in großem Umfang dienen. Sie könnte damit den Weg zu **Synthesekraftstoffen** mit niedrigem CO<sub>2</sub>-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 Hochtemperaturreakorteknologie 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 CO<sub>2</sub> 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 Kern-

energie 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 in 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 weiter zu führen, 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

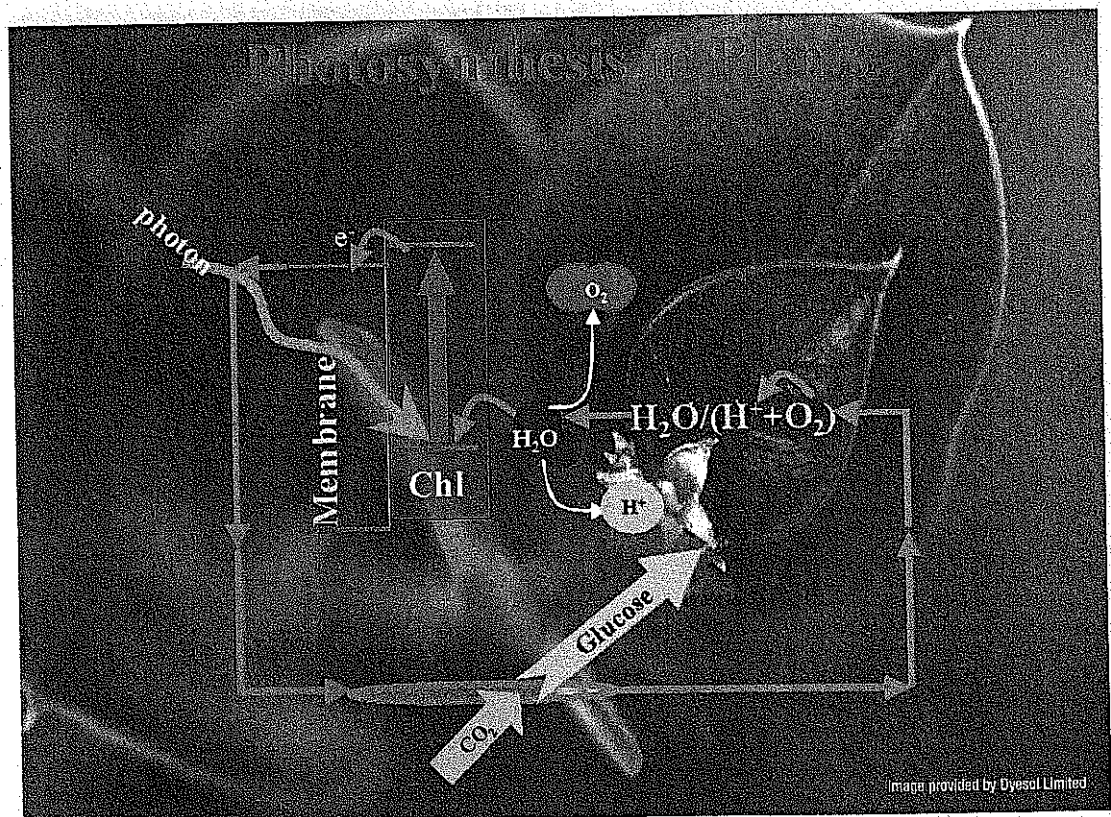
### IV Wissenschaftliche Querschnittsthemen für den Übergang zu einer nachhaltigen Energiegesellschaft

#### Naturwissenschaftliche Grundlagen von Energietransferprozessen

Viele der bei 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 Energie-

technologien ausgebaut 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 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, wie Ergebnisse aus der Grundlagenforschung in neuen Technologien, 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 werden 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, sondern es 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, die mögliche Handlungswege für den Fall aufzeigen, 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 mit 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, die den Szenarien zugrunde liegenden kausalen oder funktionalen Zusammenhänge 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 und 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 objektiveren 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, und die verschiedenen Energiesysteme wirken 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** im 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 mit zu berücksichtigen.