

NO REGRET-FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

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 Versorgungssicherheit und Importsicherheit.

Während in der Vergangenheit die Ausgestaltung elektrischer Netze meist im Bereich von Teilnetzen auf der Basis quasistationärer Berechnungsmodelle erfolgte, 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 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 über nicht 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 viele weitere Systeme identifiziert und entwickelt

werden, die sowohl Niedertemperaturwärme für den Gebäudesektor als auch Hochtemperaturwärme für solarthermische 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 Energieeinsparverordnungen 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, wo immer möglich, quantitativ modelliert werden.

Prioritäre Forschungslinien sind hier die **Analyse kultureller und interkultureller Faktoren in der Verbreitung von Energietechnologien**, auch hinsichtlich 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. Flexibilitätsmargen 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.

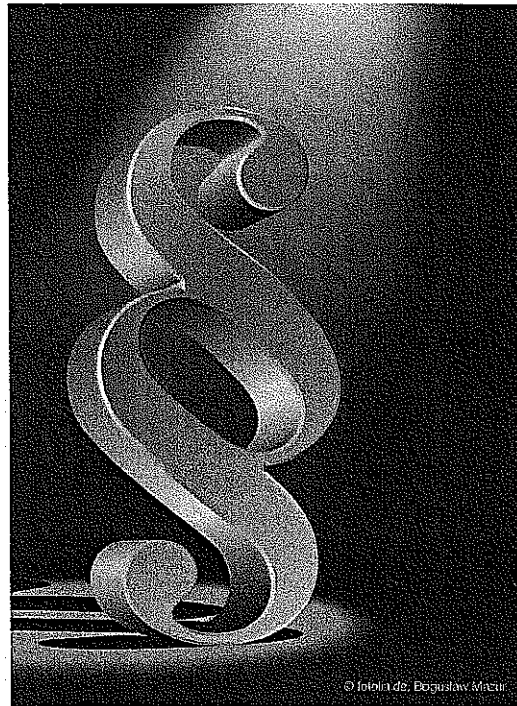
Ziele und Instrumente

Die Realisierung auch 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 CO_2). 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.



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 **im Bereich zwischen Regulierung und Selbstregulierung** genauer analysiert und bewertet werden. Zum dritten sind organisatorische, institutionelle 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, weil der Umgang mit Energiedienstleistungen und die Aufgeschlossenheit gegenüber verschiedenen Energiequellen von strukturellen, institutionellen und kulturellen Faktoren maßgeblich bestimmt wird. 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 Vorlieben 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, welche 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 auf das Verhalten von Individuen und Organisationen Einfluss haben, sowie 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, deren Bearbeitung unabhängig von politischen, gesellschaftlichen, ökonomischen und sonstigen Randbedingungen unabweisbar ist, da sie entweder von so überragender Bedeutung sind, dass sie in jedem Fall bearbeitet werden müssen, oder weil sie 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 – unter der Voraussetzung, dass grundsätzlich so viel Energie zur Verfügung steht, dass man frei auswählen kann – Konsequenzen für die Energieinfrastruktur und die Energienutzung haben, mit denen wiederum Erfordernisse für die Energieforschung verbunden sind.

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, sondern sie dient zur Schärfung des Blicks auf die **systemischen Implikationen**, wenn bestimmte Weichenstellungen bezüglich der Quelle der Primärenergie getroffen werden. So wird beispielsweise klar werden, dass, wenn sich die Politik für eine primär auf erneuerbaren Quellen beruhende Versorgungsstruktur entscheiden sollte, in der Forschung mit höchster Priorität an einer Verbesserung der zum Einsatz kommenden Netze und an neuen Methoden der Energiespeicherung gearbeitet werden muss. Bei einer im Wesentlichen auf fossilen Quellen beruhenden Struktur ist eine Konzentration auf Technologien zur Beherrschung der CO₂-Emissionen, die mit

der Nutzung fossiler Energiequellen untrennbar verbunden sind, unabdingbar. Die im Folgenden diskutierten Module erlauben eine schlüssige Darstellung systemischer Implikationen, und in allen drei Modulen zusammengenommen 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, sondern **Forschungspolitik so offen gestalten**, 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, der kurzfristigen Änderung der weltweiten ökonomischen, sozialen und technologischen Rahmenbedingungen angepasste Strategien beizubehalten. Insofern werden wir uns stärker als bislang auf permanente Transformationsprozesse einzustellen haben und lernen müssen, eine Reihe von Brückentechnologien und Krisenüberbrü-

ckungsstrategien bis zur Einsatzfähigkeit zu entwickeln, selbst wenn – je nach veränderten Rahmenbedingungen – nicht alle von ihnen benötigt werden.

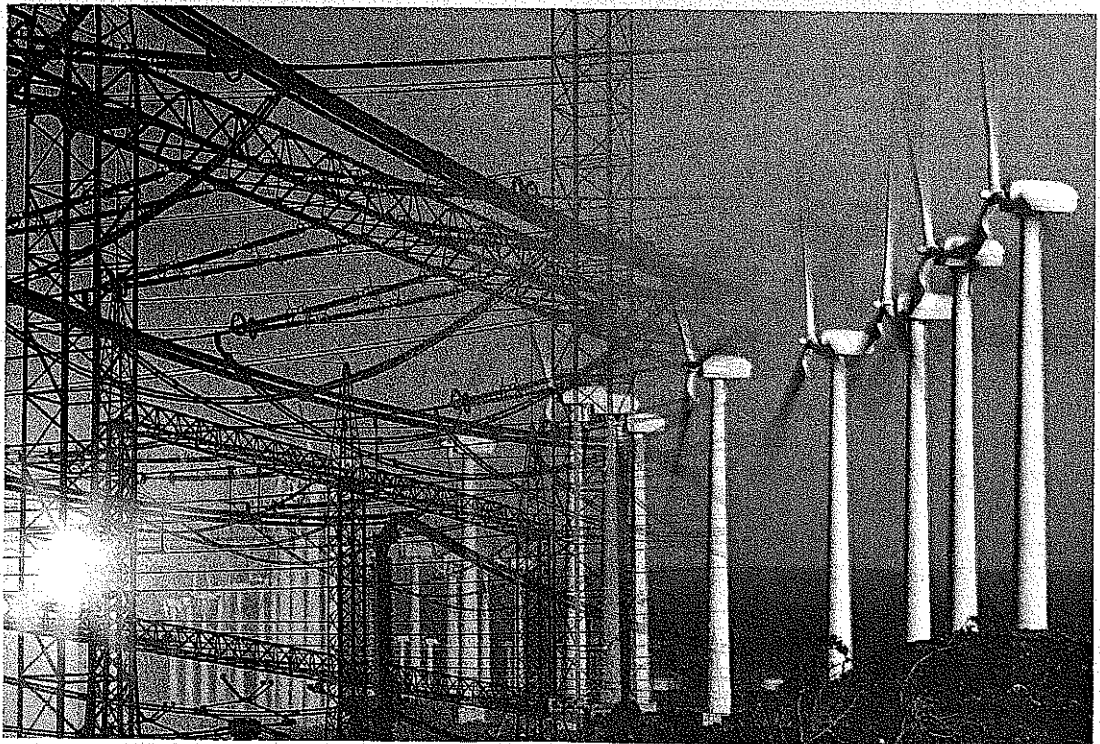
Modul 1: Erneuerbare Energien

Erneuerbare Energien, auch regenerative Energien genannt, stammen aus nachhaltigen Quellen. Sie bleiben – nach menschlichen Zeiträumen gemessen – kontinuierlich 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 die fossilen Energien. Die **Kernfusion** ist aufgrund der faktisch unbegrenzten Verfügbarkeit ihres Brennstoffs – der Wasserstoff-Isotope Deu-

terium 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 werden auch früher wenig nutzbare Waldgebiete mögliche Standorte für weitere Anlagen. Erhebliche Potenziale werden off-shore gesehen, allerdings besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf in Hinblick auf die Robustheit der Anlagen, deren Wartungsarmut und Langzeitbetriebsfähigkeit. Da **Windenergie** als un stetig anfallende Quelle nur in einem stabilen integrierten Gesamtsystem mit ausreichender Speicherkapazität ihre volle Leistungsfähigkeit entwickeln kann, sind intensive Forschungsanstrengungen im Bereich intelligenter Datenverarbeitungsmodelle und Kommunikationssysteme notwendig, die eine **Vernetzung von Windkraftwerken** und anderen Erzeugereinheiten national und grenzüberschreitend entscheidend 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, die allerdings die parallele Entwicklung und Implementierung von leistungsfähigen regionalen, **nationalen und internationalen Transportnetzen** notwendig machen. In einem derartig ausgleichenden Verbund könnten Speicher für die verschiedenen Energieformen nicht mehr so wichtig sein wie in einem regionalen 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, und **ökonomische Modelle** zu entwickeln, die für alle beteiligten Partner (Erzeugerland, 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 zunehmend im Vergleich mit fossilen und nuklearen Bereitstellung von elektrischer Energie 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

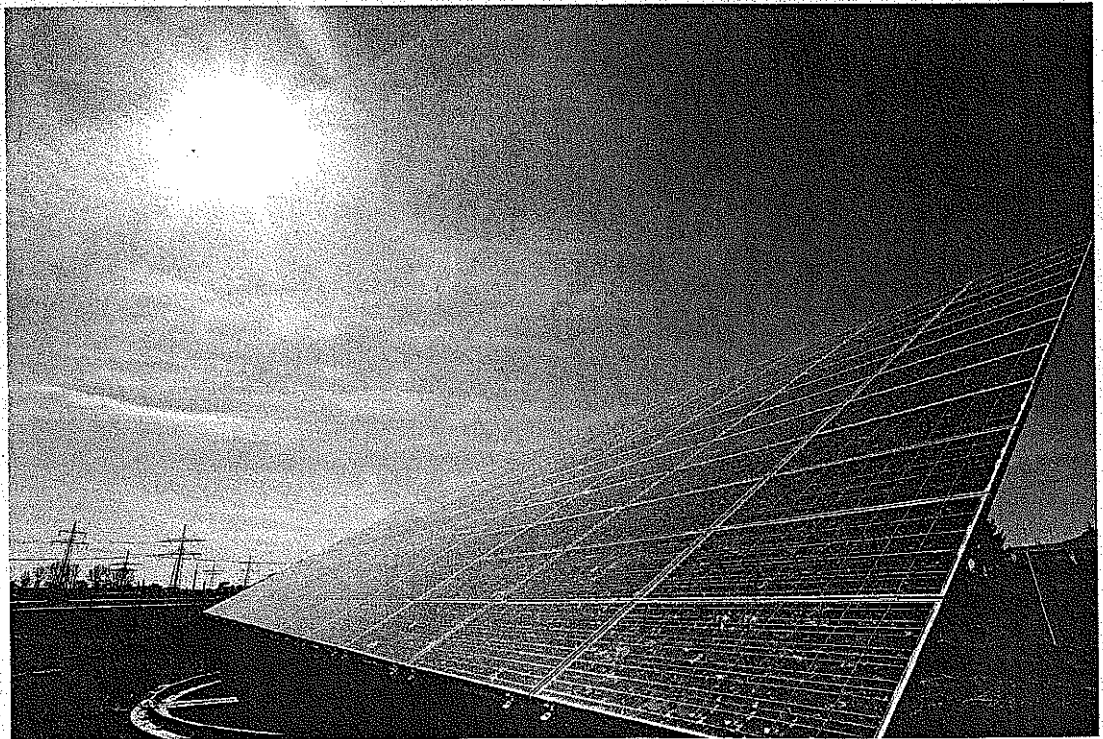
III FORSCHUNGSPOTENZIALE

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 Verringerung der Kosten des Absorbers durch verbesserte Synthesetechnologien oder die Entwicklung von Dünnschichtsolarzellen mit hoher Effizienz. Bei hochkonzentrierenden 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, und 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 Receiver erforderlich. Um solarthermische Kraftwerke ohne wesentliche Tag/Nachtschwankungen betreiben





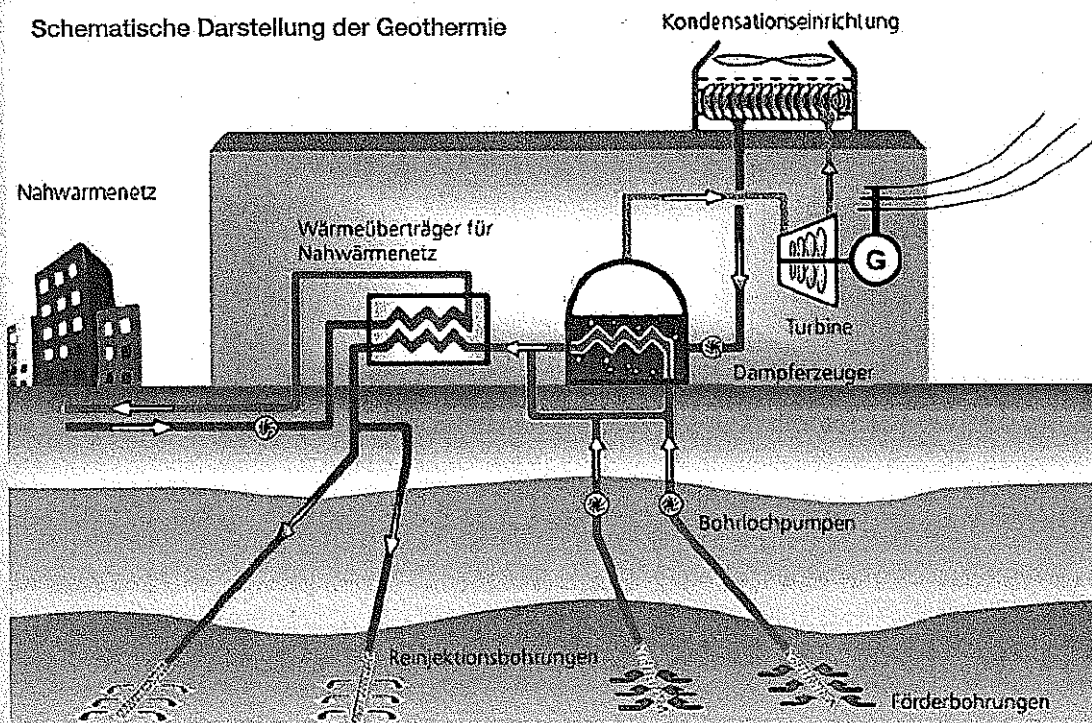
zu können, sind kostengünstige **Materialien zur Speicherung von Wärme** auf dem richtigen Temperaturniveau erforderlich. Verfahren zum beschleunigten Altern, die der experimentellen Bestimmung der Lebensdauer dienen, sind auch für kurze Entwicklungszyklen von relativ großer praktischer Bedeutung. Zur 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 erneuerbare 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; die Entwicklung kosteneffizienter Prospektions-, Explorations- und Bohrtechniken ist hierfür Voraussetzung. 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 wie eine effiziente Verarbeitung und Umwandlung in andere Energieformen. Hoher Forschungsbedarf besteht bei den Technologien, aus Biomasse breit nutzbare chemische Energieträger zu erzeugen, ebenso wie in der Effizienzsteigerung bei der Produktion der **Biomasse**, z. B. durch Züchtungsforschung oder den Einsatz grüner Gentechnologie im Bereich von Energiepflanzen. 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 Biomassen aus marginalen Standorten zu nutzen.

Biomasse ist ein verlustarmer – wenn auch nicht sehr effizienter – Speicher für Sonnenenergie und CO_2 und puffert deren zeitliche Schwankungen. 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 werden zukünftig die Umwandlung in chemische Energieträger und Grundstoffe, die aus Biomasse gewonnen werden, 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 elektrischer Energie erhalten werden. Da diese Energieform in genau dem selben Umfang verbraucht werden muss, wie sie erzeugt wird, dies aufgrund unetlicher Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen aber nicht möglich ist, 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** unterschiedli-

