

## ZUKÜNFTIGE ENERGIESYSTEME

**Harald Bradke**

Fraunhofer Institut für Systemtechnik, Abteilung Energietechnik und Energiepolitik

### 1 Einleitung

Die Energieversorgung steht mittel- bis langfristig vor großen Herausforderungen: Der Energiebedarf der Menschheit könnte sich bei einer gerechten Entwicklung rund verzehnfachen, gleichzeitig müssen die Treibhausgas-Emissionen halbiert werden, außerdem ist die Verfügbarkeit vieler bisher verwendeter Energieträger begrenzt. Industrienationen sollen bis 2050 ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % reduzieren, gleichzeitig wollen wir aus der Kernenergie aussteigen: Ist dies überhaupt zu schaffen? Wenn ja, mit welchen Technologien und wann müssten sie marktreif sein? Und wäre dies überhaupt bezahlbar?

Der Beitrag versucht, trotz aller Unsicherheiten, Antworten auf diese Fragen zu geben. Nach einem kurzen Überblick über die Herausforderungen an die Energiesysteme werden wichtige mögliche Technologien (regenerative Energiequellen, neue Kernenergiesysteme, effiziente konventionelle Stromerzeugung, CO<sub>2</sub>-Abspaltung und -lagerung, rationelle Energienutzung) und ihre Lösungsbeiträge auf dem Weg in eine langfristig nachhaltige Energiewelt vorgestellt.

### 2 Die Herausforderungen

Energie ist aus unserem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken: Transport, angenehm temperierte Gebäude, Kommunikation, Ernährung, Handel, Produktion und vieles mehr wären ohne sichere und kostengünstige Energie nur sehr eingeschränkt möglich. Insbesondere die Menschen in den Entwicklungsländern hängen in ihrer wirtschaftlichen Entwicklung von einer bezahlbaren Energieversorgung ab, und gerade dort wird der Energiebedarf in den kommenden Jahrzehnten besonders steigen. Eine Verdrei- bis Verfünffachung des heutigen Weltenergiebedarfs in 100 Jahren erscheint durchaus plausibel. Auf der anderen Seite sind die zur Zeit hauptsächlich genutzten Energiequellen, allen voran Erdöl, aber auch Erdgas, nur begrenzt verfügbar. Auch wenn deren Reichweiten unter Experten kontrovers diskutiert werden: Der Höhepunkt der Erdölförderung dürfte in den nächsten 10 bis 20 Jahren überschritten werden, die maximal möglichen Fördermengen konventionellen Erdöls werden dann zurückgehen, während gleichzeitig die Nachfrage wächst. Die Konsequenzen für die Marktpreise sind leicht abzuschätzen, wenn man bedenkt, dass sich rund 80 % der noch verbleibenden Vorkommen im Nahen und Mittleren Osten konzentrieren. Zwar wird dann der Abbau von Teersanden und Ölschiefer wirtschaftlich, aber der Preis dafür wird hoch sein, auch der ökologische. Und so wie es zur Zeit aussieht, sind nicht die Reserven fossiler Energieträger das wirkliche Problem, sondern die Aufnahmefähigkeit unserer Atmosphäre für die Verbrennungsrückstände, allem voran für das Treibhausgas CO<sub>2</sub>.

Die jüngsten Berichte des Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) lassen kaum noch Zweifel daran, dass der absehbare Klimawandel von den Menschen – derzeit zu 75 % aus Industrieländern - verursacht wird, und dass dessen Auswirkungen die zukünftigen Lebensbedingungen weltweit stark beeinträchtigen werden: Stürme, Überschwemmungen, Ausweitung der Wüsten, Krankheiten und als Folge Migrationen im weltweiten Maßstab. Schon seit vielen Jahren fordern Klimatologen eine dauerhafte Halbierung der Treibhausgasemissionen. Würden im Jahre 2100 alle dann möglicherweise 12 Milliarden Menschen auf dieser Erde soviel CO<sub>2</sub> pro Kopf emittieren wie wir Westeuropäer in den 90er Jahren, so würden wir dieses Ziel um den Faktor 10 verfehlen!

Ist das Ziel überhaupt erreichbar? Kann die technische Entwicklung soviel mehr an Energieeffizienz bringen, dass die erreichten Energieeinsparungen nicht wieder von der stetig steigenden Nachfrage nach Energie konterkariert wird? Dass eine Reihe von Industrieländern gleichzeitig aus der CO<sub>2</sub>-freien Kernenergie aussteigen will, macht die Sache nicht einfacher. Und trotzdem erscheint es möglich, in Industrieländern die CO<sub>2</sub>-Emissionen in den nächsten 50 Jahren um 80 % zu reduzieren. Und wenn wir es schaffen, werden auch weltweit genügend Techniken zur Verfügung stehen, um die Ziele in den sich entwickelnden Ländern zu erreichen.

Angesichts der Größe der Herausforderung wird schnell klar, dass mit einer einzelnen Technik- oder Energieart dieses Ziel nie erreichbar sein wird. Auf dem langen Weg in ein „post-fossiles“ Zeitalter gibt es eine Reihe von bekannten und wirtschaftlichen oder nahezu wirtschaftlichen Techniken, die Zeit geben, die Kosten der dafür erforderlichen Techniken soweit zu reduzieren, dass sie wirtschaftlich einsetzbar werden.

### 3 Konventionelle Kraftwerke

Gegenwärtig liegt der Wirkungsgrad der weltweit eingesetzten Kohlekraftwerke im Durchschnitt nur bei etwa 30 %, neue weisen einen Wirkungsgrad von 47 % auf. Gleichzeitig haben sich die Investitionskosten für Kohlekraftwerke in den letzten zehn Jahren fast halbiert. Noch beachtlicher sind die Wirkungsgrade bei mit Erdgas befeuerten GuD-Kraftwerken, eine Kombination aus Gasturbinen- und Dampfkraftwerk. Hier liegt der Wirkungsgrad gegenwärtig bei 58 %. In Verbindung mit Hochtemperatur-Brennstoffzellen scheinen sogar Wirkungsgrade von fast 70 % erreichbar. Da Erdgas bei der Verbrennung nur etwa halb soviel CO<sub>2</sub> emittiert wie Kohle, wird mit diesen Kraftwerken pro erzeugter kWh nur noch etwa ein Viertel der CO<sub>2</sub>-Menge eines bestehenden Kohlekraftwerks ausgestoßen. Noch interessanter – auch wirtschaftlich betrachtet – wird das Ganze, wenn die Abwärme für Prozesswärme in der Industrie oder als Fernwärme genutzt werden kann. Einziger Schönheitsfehler: Auch Erdgas ist eigentlich viel zu selten und zu wertvoll, um es in Kraftwerken zu verbrennen.

#### 4 CO<sub>2</sub>-Abscheidung und unterirdische Lagerung

Um mittelfristig die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger zu begrenzen, steht prinzipiell auch die Möglichkeit zur Abscheidung und Lagerung von CO<sub>2</sub> zur Diskussion. Denn der Übergang zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen (derzeit 6 % Anteil in Westeuropa und nur 2 % in Deutschland) erfordert erhebliche Änderungen der Struktur der Energieversorgung und im Kapitalstock. Die Abscheidung und Einlagerung von CO<sub>2</sub> könnte sich dagegen unmittelbar in die bestehenden Strukturen von großen zentralen Stromerzeugungsanlagen oder Raffinerien an geeigneten Standorten einfügen. Die Realisierung entsprechender Investitionen würde nur den Einsatz einer kleinen Anzahl von Akteuren erfordern, die sowohl über das technische Wissen als auch über ausreichendes Kapital für die Erprobung und Umsetzung dieser Option verfügen, die allerdings immer eine beschränkte Option aus Kosten- und technischen Gründen sein würde.

Während die Technik der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus den Rauchgasen oder über die Synthesegasherstellung erprobt und verfügbar ist, wenn auch mit nicht unerheblichen Kosten, so liegen derzeit noch keine Erfahrungen mit der Einlagerung von CO<sub>2</sub> in Aquiferen oder entleerten Öl und Gasvorkommen in Deutschland vor. Aufgrund der laufenden Projekte in anderen Ländern (z. B. in den USA und Norwegen) ist jedoch davon auszugehen, dass diese Option Ende des kommenden Jahrzehnts verfügbar sein wird. Erste Schätzungen gehen dabei von einem Speicherpotenzial von insgesamt 4,4 Mrd. t CO<sub>2</sub> in Deutschland aus. Im Vergleich zu den CO<sub>2</sub> Emissionen aus Kraftwerken von derzeit etwa 0,34 Mrd. t CO<sub>2</sub>/a bedeutet dies, dass das Speichervolumen theoretisch für einen von CO<sub>2</sub>-Emissionen freien Betrieb von einem Viertel aller Kraftwerke über einen Zeitraum von etwa 40 bis 50 Jahren ausreichend ist, d. h. für etwa zwei Investitionszyklen. Für andere Länder in der EU (insbesondere die Nordseeanrainerstaaten) ergeben sich wesentlich günstigere Verhältnisse.

Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Einlagerung verursacht dabei als „End-of Pipe“ Technologie zusätzliche Kosten, die nach ersten Abschätzungen etwa 50 bis 200 DM pro vermiedene Tonne CO<sub>2</sub> betragen werden. Damit liegen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten durch CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Lagerung in vergleichbarer Höhe oder unter denen der Photovoltaik (50 bis 800 DM/t CO<sub>2</sub>), der solaren Wärme (50 bis 320 DM/t CO<sub>2</sub>) und der Geothermie (0 bis 300 DM/t CO<sub>2</sub>). In Verbindung mit gewissen strukturellen Vorteilen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung in zentral organisierten Energieversorgungssystemen könnte dieser Technologie eine Interim-Brückenfunktion beim Übergang zu dezentralen Strukturen auf Basis des Einsatzes regenerativer Energiequellen zukommen.

Diese - nur während eines begrenzten Zeitraumes benötigte - Brückenfunktion könnte allerdings nur wahrgenommen werden, wenn schon in nächster Zeit zu klären wäre, ob neben den ausgebeuteten Erdgas- und Erdöllagerstätten Aquifere als Speicher in Frage kommen könnten. Denn es müsste gewährleistet sein, dass es durch die Einpressung des CO<sub>2</sub> in tiefe Wasserbestände nicht zur Verunreinigung jener Grundwasserressourcen kommt, die der Trink-

wasserversorgung vorbehalten bleiben müssen. Falls hierfür keine technologisch sicheren und kostengünstigen Lösungen gefunden werden, müsste man die Verpressung in tiefe Aquifere als Option ausschließen.

#### 5 Kernenergie

Obwohl derzeit Gründe der mangelnden Akzeptanz und fehlender Wirtschaftlichkeit bei Neuinvestitionen die Kernenergienutzung in eine stagnierende bis rückläufige Marktposition in fast allen OECD-Ländern bringen (Ausnahme: Japan), muss angesichts der Größe der Herausforderung die langfristige Rolle der Kernenergie als prinzipiell weiter entwickelbare Technologie mit gewohnter wissenschaftlicher Distanz bedacht werden.

Die mangelnde Akzeptanz der Kernenergie beruht derzeit auf drei Fakten: das Ausmaß eines maximalen Reaktorunfalls, die enorme Langlebigkeit einiger Zerfallsprodukte in den radioaktiven Abfällen und die Gefahr der Proliferation. Implizit unterstellt die mangelnde Akzeptanz, dass sich diese Fakten in Zukunft nicht ändern könnten. Dem ist folgendes entgegenzuhalten:

- Grundsätzlich sind Reaktortypen entwickelbar, die inhärent sicher sind und die Unfallgefahren auf das Reaktorgebäude selbst beschränken (z. B. die Hochtemperaturtechnik mit Leistungen unter 100 MW, wie sie z. Z. in Südafrika entwickelt wird).
- Die Transmutationstechnik, d. h. die gezielte Umwandlung von langlebigen in kurzlebige Radionukleiden ist prinzipiell vorstellbar; inwieweit dies in absehbaren Zeiträumen wirklich zu realisieren ist, bleibt derzeit umstritten und ist nicht klärbar. Um diese Frage zu beantworten, bedürfte es intensiver FuE-Arbeiten, um zu prüfen, ob es technisch-wirtschaftliche Lösungen geben könnte.
- Die Proliferation ist ein Problem, das nur in sehr langfristigen, derzeit nicht abschätzbaren Zeithorizonten durch eine UNO-basierte Institution lösbar erscheint. Diese Institution müsste auch die Möglichkeit eingriffsintensiver Interventionen haben, um dem Ziel gerecht werden zu können, eine weitere Ausweitung der atomwaffenbesitzenden Staaten in Folge der Zugänglichkeit zur Kernergietechnik wirksam zu unterbinden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kernenergie unter gewissen Voraussetzungen technischer und politischer Art langfristig ein Teilstück einer Technologiebrücke sein könnte, auch wenn derzeit die Akzeptanz der Kernergietechnik in ihrer heutigen Form gering ist und ihre Wirtschaftlichkeit unter den gegenwärtigen energiewirtschaftlichen Bedingungen häufig nicht gegeben ist. Die Rolle der Kernenergie könnte in der Zeit nach 2020 aus den genannten Gründen zwar anders beurteilt werden; doch ist es in Folge der oben skizzierten, erst noch zu schaffenden Voraussetzungen sowie der relativ kostengünstigen konkurrierenden Optionen, insbesondere der rationellen Stromnutzung, aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich, dass die Kernenergieoption eine größere Bedeutung als Teil einer Technologiebrücke hätte.

Die Kernfusion, die langfristig einen deutlichen Beitrag zur Deckung unseres Energiebedarfs beitragen könnte, ist vorerst nicht mehr als eine Hoffnung. Zwar sind in den vergangenen Jahren eine Reihe von Fortschritten erzielt worden, aber bis abschätzbar wird, ob oder wann Kernfusion einen nennenswerten Beitrag leisten kann, sind noch viele technische, ökonomische und ökologische Herausforderungen zu meistern.

## 6 Rationelle Energienutzung

Es gibt immer wieder die Stimmen, die fragen, ob nicht schon die meisten Energieeffizienzpotenziale ausgeschöpft seien. Dies trifft nur für wenige Bereiche einiger Energiewandler wie bei großen Elektromotoren oder modernen Kesselanlagen zu. Die entscheidenden Energieeffizienzpotenziale liegen aber nicht bei den konventionellen Energiewandlern, sondern in zwei strategischen Bereichen:

- der Verminderung der erforderlichen Nutzenergie, um eine bestimmte erwünschte Dienstleistung zu ermöglichen;
- der besseren Nutzung des Exergiegehalts einer hochwertigen Energie, z. B. der Brennstoffe und von Strom, was heute aus ökonomischen Gründen weitgehend vernachlässigt wird.

Diese beiden technologischen Bereiche eröffnen ein Energieeffizienzpotenzial, das innerhalb des nächsten Jahrhunderts den spezifischen Energiebedarf je Energiedienstleistung durchschnittlich um einen Faktor 7 bis 10 reduzieren könnte (Enquête, 1990, Jochem, 1991).

Zur Veranschaulichung derartiger Energieeinsparpotenziale seien einige Beispiele genannt, die zum Teil nahe der Wirtschaftlichkeit oder bei den heutigen Energiepreisen bereits rentabel, teilweise aber auch noch spekulativ sind, weil die konkrete Vorhersage von Techniken mit drei bis zehn Generationsfolgen in den kommenden 100 Jahren aus der Sache heraus nicht möglich ist, was rückblickend am Beispiel der Mikroelektronik und der Computertechnik sehr deutlich wird. Beispiele sind:

- Heutige Passivhäuser und -gebäude mit 20 bis 30 kWh/(m<sup>2</sup>·a) Energiebedarf benötigen etwa 12 bis 18 % des Energiebedarfs des heutigen Gebäudebestandes, der nach 100 Jahren weitgehend ausgewechselt sein dürfte.
- Nieder- und Mitteltemperaturproduktionsprozesse werden durch physikalisch-chemische oder biotechnologische Prozesse substituiert sein. Es gibt heute Beispiele, wo der Energiebedarf durch Einsatz der Membrantechnik oder von Enzymen um mehr als 80 bis 90 % gesenkt wurde.
- Energieintensive Produkte mit Hochtemperaturprozessen (z. B. Stahl, Zement, Glas) werden in den kommenden Dekaden in wesentlich höherem Ausmaß wiedergewonnen, in Folge geringeren spezifischen Gewichts für die Nutzung (z. B. durch Schäumen, bessere Konstruktion, Nanotechnik) oder durch Substitution weniger ressourcenintensiver Produkte oder Dienstleistungen weniger nachgefragt.
- Fahrzeuge werden leichter durch neue Werkstoffe, durch neue Antriebe und Konstruk-

tions- sowie Fahrzeugkonzepte; teilweise wird Mobilität durch Telekommunikation ersetzt, ohne die Dienstleistung zu reduzieren.

Die Beispiele der besseren Ausnutzung der Arbeitsfähigkeit der fossilen Energieträger und von Strom signalisieren zwar nicht so spektakuläre Energiegewinne wie die Vermeidung der spezifischen Nutzenergie, aber bei einem durchschnittlichen exergetischen Wirkungsgrad in Deutschland von etwa 15 % sind Effizienzgewinne um den Faktor 2 etwa durch Technologien wie Kraft-Wärme-Kopplung (in Zukunft auch auf der Basis von Brennstoffzellen), Wärmerückgewinnung, Wärmepumpen mit der Absorptions- oder Adsorptionstechnik (Wärmetransformatoren) und „energy cascading“ in größeren Systemen als realisierbar anzusehen.

Bei allem Reiz technologischer Potenziale existiert dennoch ein weites Feld von Einsparpotenzialen, die mit den Fragen zusammenhängen „Warum werden viele rentable Energieeffizienztechniken nicht eingesetzt?“ und „Warum wird teilweise so verschwenderisch mit Energie umgegangen?“. So ist im Winter immer noch zu beobachten, dass bei laufender Heizung dauer gelüftet wird; Computermonitore trotz längerer Pausen, zum Teil auch über Nacht oder an Wochenenden nicht ausgeschaltet werden; diese Geräte auch im ausgeschalteten Zustand noch Strom verbrauchen, weil der Schalter hinter dem Transformator angeordnet wurde; noch viel zu häufig bei einer Fassadensanierung im Altbaubereich trotz hoher Kosteneffizienz und entsprechender Verordnungen keine Wärmedämmung angebracht wird.

## 7 Erneuerbare Energien

In der gesamten energiepolitischen Diskussion herrscht allgemein Konsens über die künftige Rolle erneuerbarer Energieträger. Ihr Anteil an der deutschen wie der globalen Energieversorgung wird demnach im langfristigen Rahmen deutlich zunehmen. Das Kernelement des sogenannten Solarzeitalters soll ein Mix verschiedener dezentraler Systeme zur Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie von kleinen KWK-Anlagen und großen Feuerungsanlagen einschließlich KWK bilden. Ein Dissens besteht bisher hauptsächlich im zeitlichen Ablauf der Einführung erneuerbarer Energieträger und daher auch über deren Anteile zu bestimmten Zeitpunkten.

Insbesondere beim Thema erneuerbare Energieträger ist immer von einem Mix einer Reihe von Technologien auszugehen. Systemanalytische Untersuchungen einzelner Technologien zeigen, dass deren Einsatzmöglichkeiten aufgrund ihrer weitgehenden Abhängigkeit von äußeren Faktoren (Einstrahlungs-, Windverhältnisse etc.) begrenzt werden. Diesem Aspekt kann nur durch eine geeignete Kopplung verschiedener Technologien Rechnung getragen werden, so dass die Nachteile der jeweiligen Technologien ausgeglichen werden.

Aus Untersuchungen der letzten Jahre sind belastbare Angaben zu den Potenzialen erneuerbarer Energieträger in Deutschland ableitbar. BMU/UBA weisen ein Primärenergie-Referenz-

potenzial von insgesamt 8 500 PJ/a aus, was fast 60 % des Primärenergieverbrauchs im Jahre 1997 entspricht. Dahinter steht ein potenzieller Beitrag zur Stromerzeugung in Höhe von 525 TWh/a (rund 95 % der Bruttostromerzeugung) und zur Wärmeerzeugung in Höhe von 3 600 PJ/a (etwa 70 % des Bedarfs).

Für diese beiden Nutzungen stellt die aus Solarstrahlung gewinnbare Energie mit 39 % den größten Anteil, gefolgt von Windenergie (34 %, einschließlich Offshore), Geothermie (16 %) und Biomasse (9 %). Die genannten Potenziale stellen aus heutiger Sicht einen ausreichend gesicherten Orientierungsrahmen für das auch technisch-umsetzbare Potenzial dar. Es ist in jedem Fall groß genug, um für regenerative Energien einen zentralen Beitrag zur Energieversorgung im Laufe des nächsten Jahrhunderts anzustreben. Gleichwohl existieren noch zahlreiche offene Fragen oder einige Beschränkungen, die Beachtung finden müssen.

Ohne im Detail auf die technologischen Langfristoptionen erneuerbarer Energieträger einzugehen, werden die Hauptstrategien im Folgenden kurz erläutert. Aufgrund des unterschiedlichen Entwicklungsstandes und Praxiseinsatzes der verschiedenen Regenerativenergie-Technologien sind einheitliche Aussagen zur Wirtschaftlichkeit und Praxisrelevanz aller Nutzungsoptionen noch nicht möglich. Die folgenden Zahlen zu den Anteilen einzelner Technologieoptionen beziehen sich auf das „Solare Langfristszenario“ von Nitsch und Luther (1997) sowie auf eigene Abschätzungen.

Neben der passiven Nutzung solarer Strahlung stellt die aktive Nutzung ein wichtiges Element für ein „Solarzeitalter“ dar. Die Technik solarthermischer Niedertemperatursysteme für Einzelgebäude ist weitgehend ausgereift, für Verbundsysteme besteht weiterhin Entwicklungsbedarf. Mittel- und Hochtemperatursysteme sind bisher kaum zum Einsatz gekommen. Im langfristigen Zeithorizont würde innerhalb eines Solarzeitalters der Großteil des Warmwassers mittels Niedertemperaturtechnologien bereit gestellt, aber auch im Raumheizungsbereich wären die Mitteltemperatursysteme umfassend vertreten. Hochtemperaturanlagen kämen auch dann in Deutschland nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Im Jahr 2050 ist für solarthermische Anlagen mit einem Anteil zwischen 10 und 20 % am Primärenergieverbrauch zu rechnen.

Die Erzeugung von Elektrizität mittels photovoltaischer Anlagen (PV-Anlagen) stellt einen weiteren wichtigen Bereich dar. Wie bei solarthermischen Anlagen handelt es sich um eine vornehmlich dezentral einzusetzende Technologie. Bis Mitte des nächsten Jahrhunderts könnte diese Technologie in Deutschland 5 bis 15 % des Primärenergieverbrauchs oder 15 bis 25 % des Stromverbrauchs decken.

Wasserkraft leistet bereits heute einen wichtigen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung. Bedeutsame Sprünge sind in Zukunft nicht mehr zu erwarten, jedoch stellt die Reaktivierung und Modernisierung von Laufwasserkraftanlagen ein leicht zu erschließendes Potenzial dar.

Im Jahr 2050 können damit 5 bis 10 % des Elektrizitätsbedarfs gedeckt werden.

Die Stromerzeugung mittels Wind hat aufgrund der entsprechenden politischen Weichenstellung in den letzten 10 Jahren einen fast beispiellosen Aufschwung erlebt. Aber auch in den folgenden Jahrzehnten stellt der Ausbau der Windenergienutzung eine der wichtigsten Strategien dar. Dabei werden das Binnenland und vor allem der Offshore-Bereich intensiv erschlossen sowie bestehende ältere Anlagen durch leistungsstärkere ersetzt werden. Mit Windenergieanlagen könnten damit 20 bis 30 % des Stromverbrauchs gedeckt werden.

Die Nutzung von Bio-Energien hat in den letzten Jahren in energiewirtschaftlichen Diskussionen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Auch hier bestehen erhebliche Potenziale, wobei es sich in diesem Fall um eine Reihe verschiedener Technologien und Ressourcen handelt. Der wesentliche Vorteil dieser Technologien besteht darin, dass ein chemischer Energiespeicher in fester oder flüssiger Form oder als Gas vorliegt und beliebig eingesetzt werden kann. Alle Optionen der Bio-Energie zusammen würden unter den Bedingungen eines Solarzeitalters mit rund 5 bis 15 % an der Stromerzeugung oder mit 10 bis 20 % am Primärenergieverbrauch beteiligt sein.

Eine weitere Hauptoption ist die Geothermie. Auch hier handelt es sich um verschiedene Nutzungsoptionen, beispielsweise um oberflächennahe Anlagen oder Sonden. Langfristig dürfte die Geothermie einen Anteil von 5 bis 15 % am Primärenergieverbrauch erreichen.

Nach dem Langfristszenario von Nitsch/Luther werden die fossilen Energieträger im Jahr 2050 noch mit 40 % zur Deckung des Primärenergiebedarfs beteiligt sein. Andere Szenarien weisen teils niedrigere, teils höhere Werte aus, insgesamt ist aber immer eine ähnliche Tendenz wie bei den oben genannten Strategien zu erkennen. Insofern ist in den folgenden Jahrzehnten mit einem weiterhin zunehmendem Einsatz erneuerbarer Energieträger zu rechnen, ohne dass die fossilen zunächst komplett ersetzt werden.

Völlig offen sind hingegen noch die möglichen Anteile weiterer Optionen erneuerbarer Energien, insbesondere von chemischen Energieträgern wie Methanol oder Wasserstoff oder des Imports von Strom, der auf Basis erneuerbarer Energieträger erzeugt wurde. Aufgrund der besseren Einstrahlungsverhältnisse im Sonnengürtel der Erde sind die Potenziale für REG-Strom oder -Wasserstoff grundsätzlich kaum begrenzt. Heute kann jedoch noch nicht beantwortet werden, ob überhaupt und wenn ja, welche der Technologien zum Einsatz kommen werden. Nitsch/Luther weisen in ihrem Szenario einen Anteil von rund einem Viertel an der gesamten Stromerzeugung aus, der durch REG-Stromimporte (aus PV- und solarthermischen Kraftwerken) bereitgestellt wird. Die Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“ hat in ihren Szenarien zwar keinen Anteil von REG-Importstrom (Zeithorizont 2020) berücksichtigt, nennt aber die damit verbundenen Technologien als „notwendig“ für eine langfristige Strategie (Enquête 1995 S. 212ff).

Zudem könnten künftig Kurzzeitleistungs- und Langzeitarbeitsspeicher im Stromsektor wertvolle Aufgaben im Rahmen eines solar-gestützten Energiesystems übernehmen. Auch hier ist die mögliche Rolle noch nicht ausreichend geklärt.

Langfristig wird ein zukunftsfähiges Energiesystem weitaus dezentraler als heute aufgebaut sein und die Fähigkeit besitzen, deutlich flexibler auf äußere Änderungen zu reagieren als heute. Gerade aber die leitungsgebundene Energiewirtschaft wird in Zukunft ein noch stärkeres Gewicht erhalten. Daher ist bei heutigen Infrastrukturentscheidungen, die immer mindestens mittelfristiger, häufig aber auch langfristiger Natur sind, das Ziel in Betracht zu ziehen. Ansonsten können schnell Entscheidungen getroffen werden, die es entweder nicht erlauben das Ziel zu erreichen oder zu äußerst hohen Kosten führen (stranded investments etc.). Insbesondere Investition im Bereich der konventionellen und atomaren Kraftwerkstechnik sind unter dieser Prämisse zu beleuchten. Auch ist beim Einsatz neuer Technologien, also auch bei erneuerbaren Energien, darauf zu achten, dass andere ökosystemare Zusammenhänge nicht verletzt werden (beispielsweise Energiepflanzen in der konventionellen Landwirtschaft).

Im Vergleich zur fossilen Energietechnik stellt die betriebswirtschaftliche Kostensituation erneuerbarer Energieträger noch ein Haupthemmnis dar. Insbesondere bei PV-Anlagen ist eine Kostensenkung notwendig. Aufgrund der Eigenschaft von PV, im Gegensatz zu konventionellen Kraftwerken ein Massenprodukt zu sein, ist damit aber über Markteinführungsprogramme mittelfristig mit einer Kostensenkung zu rechnen. Insofern erfüllt das 100 000 Dächer-Programm des BMWi und das 200 Mio. DM-Programm zur Förderung erneuerbarer Energiequellen die Anforderung nach einer zukunftsorientierten Energiepolitik. Andererseits wird ohne Einbeziehung externer Kosten die Photovoltaik wohl nie die Stromerzeugungskosten konventioneller Kraftwerke erreichen. Eine an ökologischen Aspekten orientierte Erhöhung der Preise fossiler Energieträger ist damit ebenso notwendig für eine erfolgreiche Markteinführung von PV.

Für die anderen Hauptstrategien zur Einführung regenerativer Energien treffen diese Aussagen in ähnlicher Weise zu. Einerseits werden Kostensenkungen benötigt, die aufgrund des Massenproduktcharakters wahrscheinlich sind, und andererseits müssen die Preise fossiler Energieträger externe Kosten widerspiegeln.

## 8 Suffizienz

Und letztlich stellt sich die Frage „Wie viel ist genug?“. So wurde z. B. im Raumwärmebereich die mit technischen Mitteln erreichte Reduktion des spezifischen Wärmebedarfs durch die überproportionale Zunahme der Wohnfläche pro Kopf der Bevölkerung überkompensiert; die technischen Effizienzverbesserungen im PKW-Bereich durch Aerodynamik, motorische Maßnahmen, leichteren Werkstoffen etc. durch ständig größere Fahrzeuge konterkariert, von dem rapiden Wachstum der insgesamt zurückgelegten Fahrleistung ganz zu schweigen. Alle

diese Fragen hängen letztlich mit Fragen nach den Wertesystemen der Menschen zusammen. Wie weit diese Werte der Menschen in einer globalen, marktwirtschaftliche Demokratie in eine „positivere“ Richtung zu beeinflussen sind, bedarf noch vielfältiger psychologischer, soziologischer und politikwissenschaftlicher Forschung. Die dadurch erschließbaren Potenziale sind sicherlich in einer ähnlichen Größenordnung wie die technischen, und nur beide zusammen werden ein dauerhaftes Leben auf diesem Planeten ermöglichen.

## 9 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich über die vier Technologie-Optionen der Technologiebrücke sagen, dass die rationelle Energienutzung permanent und die erneuerbaren Energiequellen langfristig zunehmend die tragenden Stützen der Technologiebrücke des 21. Jahrhunderts sein werden. Sie verdienen – diese Dynamik beachtend – die höchste energiepolitische Aufmerksamkeit, die insbesondere der Energieeffizienz bisher nicht hinreichend geschenkt wurde. Ob und unter welchen Bedingungen die „neue“ Kernenergie und die CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung eine längere oder nur eine Interims-Periode zu den Stützen der Technologiebrücke in Deutschland gehören werden, wird erst nach Jahren intensiver Forschung und Entwicklung beantwortbar sein.

**Literatur:**

BMU/UBA 1999: Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des BMU und des UBA. J. Nitsch, M. Fischeck et al. Stuttgart, Berlin Veröffentlichung Dezember 1999. Zwischenbericht März 1999

DIW, EWI, FhG-ISI, Öko-Institut, Prognos, WI: Energiewirtschaftliche Voraussetzungen und energiepolitische Handlungsmöglichkeiten für eine zukunftsfähige Energieentwicklung in Deutschland. - Wissenschaftliche Begleitung des Energiedialogs –, 2000

Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages: Mehr Zukunft für die Erde. Ecnomica Verlag: Bonn 1995

Enquête-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des Deutschen Bundestages (Hrsg.): Energie und Klima. Bd. 1-10. Bonn: Economica 1990

Jochem, E.: Long-term Potentials of Rational Energy Use- the Unknown Possibilities Reducing Greenhouse Gas Emissions, Energy & Environment (1991), Nr. 1, S. 31-44

Leitlinien zur Energiepolitik – Ergebnisse des Energiedialogs ([www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)), 2000

Nitsch, Luther et al.: Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung - Ein solares Langfristszenario für Deutschland. DLR/FHG-ISE. Stuttgart, Freiburg 1997