

cher Bauart insbesondere für kleine und mittlere Leistungen und Energiemengen der meistversprechende Weg zu sein, da dieser – neben der Speicherung in Form von Pumpspeicherkraftwerken oder **Druckgasspeichern**, für die adiabate Versionen zu entwickeln sind – mit den geringsten Verlusten verbunden ist. Erforderlich ist allerdings eine deutliche Reduktion der Herstellungskosten (Faktor drei) und eine Steigerung der Energie- und Leistungsdichte der Energiespeicher um einen realistischen Faktor zwei bis drei (Wunschziel Faktor fünf bis zehn), wofür die Lithium-Ionen-Technologie viel versprechende Optionen bietet. Gegenwärtig sind die Speicherdichten jedoch noch zu gering und die Systemkosten zu hoch. Notwendig ist daher die Erforschung und Entwicklung neuer Material-, Fertigungs- und Systemintegrationskonzepte, um den höheren Anforderungen hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer, Sicherheit und Optimierung der Kosten gerecht werden zu können. Zusätzlich müssen grundlegende Arbeiten an den **nächsten Generationen von Batterien** begonnen und mit zunehmender Intensität vorangetrieben werden.

Neben der Speicherung elektrischer Energie sind auch **Wärmespeichermaterialien**, insbesondere **Latentwärmespeicher**, wesentliche Komponenten, sowohl im Bereich der Bereitstellung von Niedertemperaturwärme zur Gebäudeheizung als auch zur Speicherung von Mittel- und Hochtemperaturwärme, um die Tag-/Nachtschwankungen von solarthermischen Kraftwerken auszugleichen. Eine Reihe von Latentwärmespeichern ist bekannt, es wird jedoch erforderlich sein, für unterschiedliche Temperaturniveaus Speichersysteme mit hohen Speicherkapazitäten zu entwickeln, um jeweils angepasste Lösungen anbieten zu können.

Die lokalen Speicherkomponenten müssen durch ein „**intelligentes**“ **Stromnetz** für den überregionalen Transport und die lokale Verteilung effizient erschlossen werden. Die Echtzeit-Zustandsanalyse und Modellierung solch hochdynamischer Netze stellt eine große Herausforderung dar, für die entsprechende Analyse- und Modellierungswerkzeuge erforderlich sind. Eine zentrale Laststeuerung im Netz kann auch durch softwaregesteuerten Zugriff der Energieversorger auf

energieverbrauchende Aggregate beim Verbraucher erreicht werden. Hierzu werden viele Verbraucher jedoch nicht ohne weiteres bereit sein, so dass derartige Umstellungen des Systems flankiert werden müssten durch Untersuchungen zur Akzeptanz einer solchen Technologie, zur Effektivität wirtschaftlicher Anreize oder zur Möglichkeit gesetzlicher Regelungen.

Allerdings ist nicht abzusehen, dass auch bei größten Forschungsanstrengungen genügend hohe Speicherdichten im Netz, in Batterien und in anderen Speichersystemen erzielt werden können, mit denen eine **strategische Energiereserve** für Deutschland aufgebaut werden könnte. Für diese Zwecke ist eine **stoffliche Speicherung** durch chemische Verbindungen hohen Energiegehalts unabdingbar. Hier ist systemische Forschung erforderlich, um solche Verbindungen zu identifizieren und dann für ausgewählte, viel versprechende Optionen eine Technologieplattform zu schaffen.

Als Energieträger- und -speichermaterialien werden derzeit insbesondere Wasserstoff, Methan und Methanol diskutiert. Wasserstoff hat u. a. den Vorteil, dass er ohne CO_2 -Freisetzung verbrannt werden kann. Verglichen mit Methanol und Methan sind hinsichtlich Transport, Speicherung und Sicherheit jedoch noch massive Forschungsanstrengungen notwendig. Außerdem ist seine Erzeugung aus elektrischer Energie, die Speicherung und die anschließende Rückverstromung mit erheblichen energetischen Verlusten in Höhe von 60-80 % verbunden, so dass für die Einführung eines Wasserstoffsystems alle Komponenten dieser Wandlungsketten entscheidend verbessert werden müssen. Methan und Methanol können bereits heute für mobile Anwendungen eingesetzt werden. Für Methanol ist die derzeitige Infrastruktur weitgehend nutzbar, allerdings erscheint der Zugang zu Methanol energetisch wenig effizient. Eine Infrastruktur für Methan (Erdgasfahrzeuge) wird derzeit parallel zu der auf flüssigen Kohlenwasserstoffen basierenden Infrastruktur aufgebaut, Speicher für große Mengen stehen zur Verfügung. Prinzipiell gibt es viele Wege, die aus regenerativen Quellen zu Methan führen. Diese sind jedoch alle optimierungsbedürftig.

Vor allem die chemisch-thermischen Verarbeitungsprozesse hin zu hochwertigen synthetischen flüssigen Energieträgern (z.B. **Biomass-to-Liquid**-Kraftstoffe) ermöglichen eine unmittelbare Einbindung in die bestehende Infrastruktur. Die Entwicklung effizienter Herstellverfahren direkt aus Biomasse erfordert jedoch entsprechende Forschungsanstrengungen, insbesondere um den Übergang zu ökonomisch vorteilhaften Großtechnologien zu vollziehen. Hier sind weitere Forschungsanstrengungen hinsichtlich der Effizienz der Umsetzung zu den Speichermolekülen notwendig. Die Technologieentwicklung muss von einer ökonomischen und soziologischen Forschung begleitet werden, um zu klären, welche der oben genannten Speichertechnologien Akzeptanzprobleme oder große ökonomische Hürden erwarten ließe.

Mobilität als Verbrauchssektor mit derzeit etwa einem Drittel unseres Endenergieverbrauchs stellt aufgrund der erforderlichen hohen Energiedichte des mitgeführten Kraftstoffs eine besondere Herausforderung für ein Energiesystem dar, das wesentlich auf erneuerbaren Quellen beruht. Kurz- bis mittelfristig wird der Anteil an Biokraftstoffen zunehmen. Forschungsbedarf besteht hier in der Erhöhung der Effizienz bei der Gewinnung der **Biokraftstoffe**. Darüber hinaus sind Nutzungskonflikte und ökonomische Randbedingungen grundsätzlich zu klären. Die oben beschriebenen Energiespeicheroptionen bzw. die Verbesserung der Leistungsfähigkeit von mobilen Batterien werden auch bei der Realisierung von **Konzepten zur Elektromobilität** eine wichtige Rolle spielen. Mittelfristig ist ein Szenario vorstellbar, in dem Kurzstrecken mittels Elektrofahrzeugen bewältigt werden, Langstrecken mit anderen Fahrzeugtechnologien wie z. B. der Wasserstoffbrennstoffzelle oder Ähnlichem, alternativ mit öffentlichen Verkehrssystemen wie der Bahn. Forschungsanstrengungen sind im Bereich der Einbindung elektrifizierter Antriebe in das Stromnetz, der Speichertechnologien im Fahrzeug und Energieumwandlungs- und Übertragungstechnologien notwendig. Eine derartige Umstellung unseres Mobilitätssystems würde sehr tiefgreifend sein und entsprechend lange Zeitskalen aufweisen.

Hier ist umfassende systemische Forschung zur Neustrukturierung und zu Umstellungsstrategien erforderlich. Des Weiteren besteht zum Teil erheblicher Forschungsbedarf zum Verbraucherverhalten, zur Akzeptanz und bezüglich der politischen Rahmenbedingungen.

Unter der Prämisse, dass ein Szenario, das wesentlich auf regenerativen Quellen beruht, im Wesentlichen ein Knappheitsszenario ist, wird auch die effiziente Bereitstellung und Nutzung von Wärmeenergie eine hohe Priorität erhalten, die etwa ein Drittel des Endenergiebedarfs Deutschlands ausmacht. Forschungsbedarf besteht hier insbesondere im Bereich des **energiegünstigen Bauens**, der **Niedertemperatur-Solarthermie**, der **Wärmespeicherung** in dezentralen Einheiten, und der Anwendung von **Wärmepumpen** in weitgehend elektrischen Systemen. Ziel solcher Forschung muss es sein, im Bereich von Wärmeenergie fast vollständig auf extern gelieferte Energie verzichten zu können.

Langfristig muss angestrebt werden, auch in einem regenerativen Energiesystem aus einer erwarteten Knappheitssituation herauszukommen. Hier bietet die **Kernfusion**, die aufgrund der faktisch unbegrenzten Brennstoffvorräte und der nahezu CO₂-freien Energieerzeugung ebenfalls zu den regenerativen Energiequellen gezählt werden kann, langfristig die besten Perspektiven. Allerdings kann man mit einer großtechnischen Nutzung dieser Energiequelle erst in einigen Jahrzehnten rechnen. Der Weg dorthin erfordert die Optimierung plasmaphysikalischer Betriebs-szenarien sowie die (Weiter-) Entwicklung bzw. Qualifizierung kraftwerkstauglicher Technologien (Plasmahelzung, Brennstoffkreislauf) und Strukturmaterialien (niedrige Aktivierung durch Neutronen, kurze Abklingzeiten). Mit dem jetzt im Bau befindlichen Experimentalreaktor ITER werden die meisten Fragen zur Plasmaphysik geklärt und viele Technologien zur Einsatzreife gebracht werden. Mit dem Experiment Wendelstein 7-X wird ein alternatives Plasmaeinschlusskonzept für kontinuierlichen Betrieb erprobt. Für die Materialqualifizierung wird eine zusätzliche Großanlage, die Fusionsneutronenquelle IFMIF, konzipiert. Auf



der Basis der so gewonnenen Erkenntnisse kann dann das erste **Fusionskraftwerk „DEMO“** in ca. drei Jahrzehnten in Betrieb gehen. Signifikante Beiträge zur Energieversorgung sind wohl erst für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts zu erwarten, allerdings könnten durch kontinuierliche Forschung auf diesem Gebiet die Voraussetzungen für eine zeitgerechte Einführung der Kernfusion in den künftigen Energiemarkt geschaffen werden.

Zusammenfassende Bewertung der Forschungsprioritäten auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien

Die **Schlüsselfrage** der Forschung zu erneuerbaren Energien ist ein hoher Grad räumlich großräumiger **Vernetzung verschiedener – häufig fluktuierender – Energiequellen**, um die immer mit z. T. erheblichen Verlusten verbundene Speicherung von Energie soweit als möglich zu vermeiden. Nichtsdestoweniger sollten **Speicher** sowohl zur Abpufferung von fluktuierender Erzeugung, als auch zur Gewährleistung eines Mobilitätsszenarios jenseits von Öl und schließlich

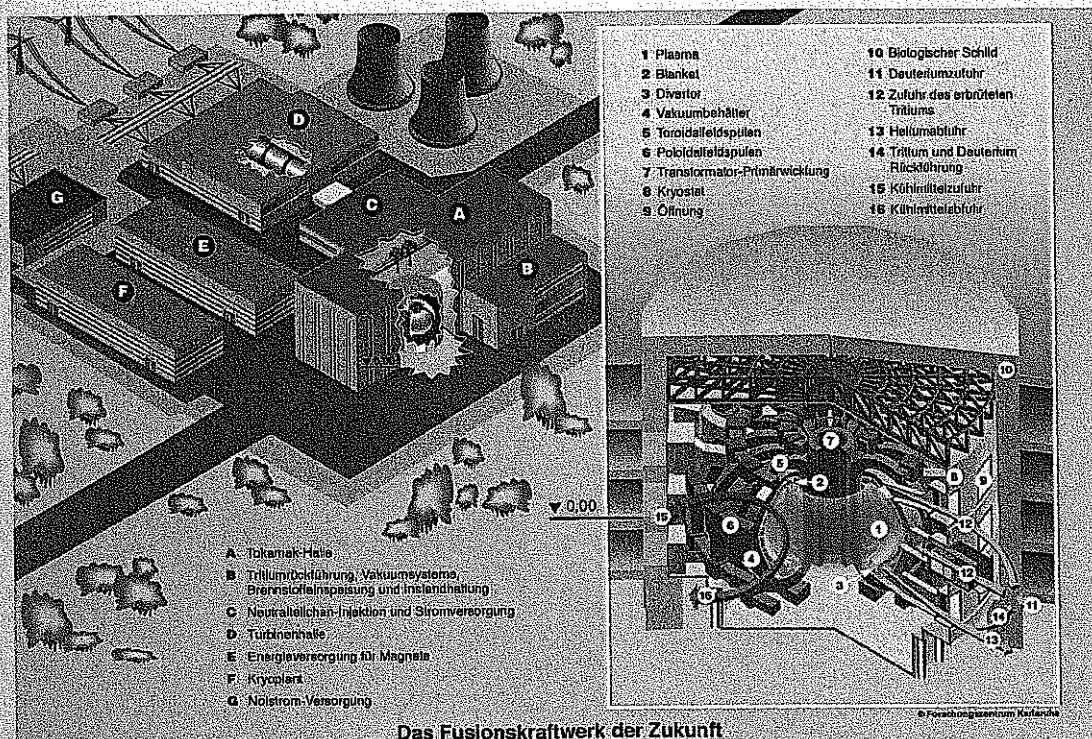
als strategischer Langzeitspeicher auf stofflicher Basis Gegenstand von Forschungsaktivitäten mit **höchster Priorität** sein.

Wesentlich ist auch die zunehmende **Erschließung solarer Strahlung** als Energiequelle zu akzeptablen Kosten, wobei die technologische Forschung in systemische Überlegungen auf europäischer, möglicherweise sogar übereuropäischer Ebene eingebettet werden muss.

Langfristig erscheint in einem regenerativen Energiesystem, aber auch grundsätzlich, die **Fusion** als eine sehr attraktive Option, die trotz der langen Zeitskalen weiterverfolgt werden sollte.

Modul 2: Fossile Energien

Fossile Energieträger decken, so die Internationale Energieagentur IEA, auch heute noch, trotz verschiedenster anderer Technologieoptionen, über 75 % des weltweiten Primärenergiebedarfs. Die ursprüngliche Dominanz der Kohle ist dem Dreigestirn Kohle, Öl und Gas gewichen. Die fossilen



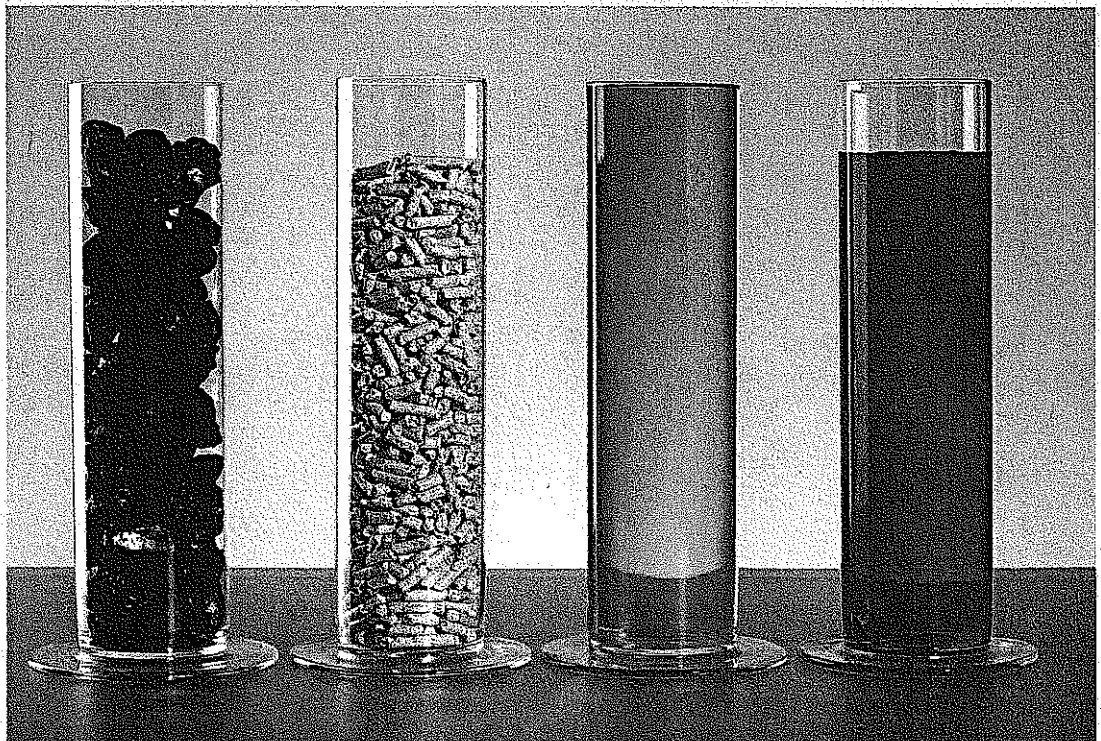
III FORSCHUNGSPOTENZIALE

Energieträger sind bis heute unerreicht in Energiedichte und Handhabbarkeit. Daher eignen sie sich besonders auch für mobile Anwendungen. Obwohl die Reserven, d. h. die derzeit technisch und ökonomisch nutzbaren Vorräte, nur eine begrenzte Reichweite haben und somit für die Nutzung insbesondere von Öl und Gas, mit relativ kurzen statistischen Reichweiten von 40 bis 60 Jahren, nur eine kurz- bis mittelfristige Perspektive besteht, dürften zumindest für die nächsten Jahrzehnte fossile Energieträger eine sehr wesentliche Komponente unserer Energiesysteme bilden. Wenn beispielsweise nachhaltige Verfahren zur Kohlenutzung entwickelt werden könnten, könnten fossile Energieträger sogar eine längerfristige Option bieten.

Man sollte allerdings immer berücksichtigen, dass bedeutende Mengen fossiler Energieträger in die Eisen- und Stahlindustrie (Koks aus Steinkohle) sowie in die chemische Industrie (Grundstoffe und Energieträger hauptsächlich auf Erdölbasis) einfließen. Diese Abhängigkeit und die Folgen der

Weiterentwicklung der Nutzung fossiler Energieträger auf diese Sektoren sind nicht absehbar und fordern daher tiefer gehende systemanalytische Untersuchungen.

Fossile Energieträger müssen immer in Zusammenhang mit der Versorgungssicherheit diskutiert werden. Die deutschen Vorräte an Braunkohle sind erheblich, auch die Steinkohlevorräte sind beträchtlich, wenn diese auch seit langem ökonomisch mit Importkohle nicht konkurrenzfähig ist. Gegenwärtig verfügt Deutschland noch über eine eigene Erdgasförderung, die rund ein Fünftel des heimischen Bedarfs abdeckt, das Ende dieser Reserven ist aber absehbar. Die Abhängigkeit von importiertem Erdgas hat in der jüngsten Vergangenheit wiederholt zu Lieferengpässen geführt, und die Verlässlichkeit einiger Import- und Pipeline-Netzpartner ist fragwürdig. Die Versorgungssicherheit für Erdgas hat europäische Dimensionen. Die Kapazität bestimmter Knotenpunkte der europäischen Netzarchitektur kann gegenwärtig die Anforderung, die Versorgungssicherheit durch



flexible Lieferrouten sicherzustellen, nur bedingt erfüllen. Ähnliche Überlegungen wie beim Erdgas gelten auch für die Versorgung mit Erdöl. Deutschland ist weitestgehend auf Importe aus teils politisch instabilen Regionen angewiesen. Daher gibt es besonders für eine energetische Zukunft, die stark auf fossile Energiequellen setzt, erheblichen Forschungsbedarf hinsichtlich der technologischen und soziokulturellen Rahmenbedingungen für eine stabile Energieversorgung.

Die Technologie zur Gewinnung und Wandlung **konventioneller fossiler Rohstoffe** ist bereits sehr hoch entwickelt. Dennoch kann auch auf diesem Gebiet durch Verbesserung der Effizienz die Reichweite der Energiequellen verlängert werden. Derzeit werden die Vorkommen insbesondere von Öl nur zu einem Anteil von 30-40 % ausgebeutet. Die Entwicklung von Enhanced Recovery Technologien hat auch bei geringen Steigerungen der Ausbeute einen enormen Hebel. Auch Verbesserungen in der Fördertechnik, etwa aus unterseeischen Vorkommen in Tiefen von 5000 m, können neue Vorkommen erschließen und damit Ressourcen in Reserven umwandeln. Ebenfalls sind Forschungen zu Verbesserungen in der Raffinerietechnik und der damit verbundenen Weiterentwicklung der Katalysatoren von großer Bedeutung. Allerdings sind im Bereich der Ölindustrie deutsche Unternehmen nicht sehr präsent – abgesehen von der Katalysatorindustrie und in Teilbereichen des Engineering, wo deutsche Firmen eine Spitzenstellung einnehmen. Daher sind im Bereich der Exploration, Enhanced Recovery und Raffinerietechnik Forschungsaktivitäten in Deutschland nicht prioritär, abgesehen von der **Katalyseforschung und Teilbereichen der Raffinerietechnik**, die eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung haben und über den Export die deutsche Wirtschaft stärken, wenn auch die Anwendungen selbst nicht in Deutschland liegen.

Wegen der abzusehenden langfristigen Rohstoffsituation werden vermehrt sogenannte „**nicht-konventionelle**“ Rohstoffvorkommen zur Förderung in Betracht gezogen. Beim Erdgas ruhen die Hoffnungen auf den Gashydraten, Einschlussverbindungen von Methan in einem Käfig aus Wassermolekülen. Ihr Vorkommen ist an bestimmte

Druck- und Temperaturbedingungen gebunden. Sie finden sich in den Permafrostgebieten und in vielen Bereichen am Boden der Ozeane, wobei die Menge der Hydrate in den Meeren um mehrere Größenordnungen höher eingeschätzt wird. Die Schätzungen über die gesamten Ressourcen streuen sehr weit, zwischen etwa $3 \times 10^{15} \text{ m}^3$ und etwa $8000 \times 10^{15} \text{ m}^3$. Realistischerweise kann man wohl davon ausgehen, dass die in **Gashydraten** gebundene Menge an Erdgas die des konventionellen Erdgases um ein Mehrfaches übertrifft. Daraus ergibt sich primär ein hoher Forschungsbedarf hinsichtlich der Exploration möglicher Lagerstätten, um tragfähigere Schätzungen über die tatsächlichen Vorkommen zu erhalten, begleitet von Untersuchungen der geologischen, geophysikalischen, geochemischen, mikrobiologischen, biogeochemischen und klimatologischen Grundlagen.

Wenn Gashydrate für die Förderung erschlossen werden sollen, ist die Entwicklung klima- und umweltgerechter Förder-, Verflüssigungs- und Transporttechnologien für eine wirtschaftliche Ausbeutung von Gashydratvorkommen zwingend notwendig und eröffnet beachtliches Exportpotenzial – Deutschland selbst verfügt über keine Vorkommen an Gashydraten, ist aber auf der Grundlagenseite international gut positioniert. Kurz- bis mittelfristig sollte dabei der Fokus zunächst auf der Entwicklung von Förderverfahren aus Permafrostböden bis hin zu möglichen Produktionstests liegen. Auf einer längerfristigen Zeitskala erscheinen die unterseeischen Vorkommen interessanter, wobei hier der Forschungsbedarf sowohl hinsichtlich der Grundlagen als auch der Produktionstechnologie deutlich höher ist. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, dass Gashydrate ein weit höheres Treibhauspotenzial haben als CO_2 , die Verluste in die Atmosphäre bei der Förderung und Verarbeitung müssen also gering gehalten werden. In diesem Zusammenhang wird auch die Substitution von Methan aus den Hydraten mit CO_2 diskutiert. Eine solche Technologie hätte neben dem Potenzial Methan abzubauen, den Vorteil, eine geologische Senke als CO_2 -Speichertechnologie zu erschließen, was insbesondere für Deutschland eine interessante Option mit Exportpotenzial darstellt.

Mit steigendem Erdölpreis wird auch die Gewinnung von Öl aus nicht-konventionellen Quellen wirtschaftlich attraktiver. Die Größenordnung der Ölvorkommen in **Ölsänden und Ölschiefern** wird auf 13000 Exajoule (EJ) geschätzt und ist damit ebenfalls größer als die der bekannten Vorkommen an konventionellem Erdöl. Erste technische Umsetzungen zur Ölgewinnung in Kanada führten zu massiven Umweltbeeinträchtigungen. In Analogie zu den Gashydraten ist auch hier der **Entwicklung umweltgerechter und wirtschaftlicher Fördertechnologien** **Priorität** einzuräumen. Die Wirtschaftlichkeit einer Förderung nicht-konventioneller Vorkommen kann gegenwärtig nicht beurteilt werden. Angesichts der deutlich schlechteren Qualität der nicht-konventionellen Ölvorkommen werden adaptierte Prozesstechnologien mit angepassten Katalysatorsystemen erforderlich werden, darüber hinaus ist zu untersuchen, inwieweit die als Nebenprodukt anfallenden Metalle die Metallmärkte verändern können.

Aufgrund der Tatsache, dass weder Gashydrate noch nicht-konventionelle Ölvorkommen in

Deutschland vorkommen, sollte die Forschung in Deutschland nur auf solchen Feldern konzentriert gefördert werden, auf denen ein wissenschaftlicher oder technologischer Vorsprung vor Ländern besteht, die über die entsprechenden Lagerstätten verfügen. Interessant sind solche Vorkommen nicht zuletzt deswegen, weil sie aufgrund stärkerer geographischer Diversifizierung die Versorgungssicherheit erhöhen.

Die Hauptanwendung fossiler Energieträger liegt derzeit in ihrer **energetischen Nutzung**, wenn auch gerade im Falle des Öls die stoffliche Nutzung in der Chemieindustrie wegen der hohen Wertschöpfung von erheblicher Bedeutung ist. Die hohe Energiedichte fossiler Energieträger macht sie zu idealen Kandidaten für netzunabhängige mobile Anwendungen. Des Weiteren stellen sie ihre eigenen stofflichen Speicher. Eine Weiterentwicklung von Speichertechnologien im Zusammenhang mit der Nutzung fossiler Energieträger gehört somit nicht zu den prioritären Forschungsfeldern. Fossile Energieträger finden sich derzeit in allen Nutzungsbereichen, von zentralen **Kraft-**



werken über die Erzeugung von Niedertemperaturwärme für Heizzwecke bis hin zum gesamten Verkehrssektor.

Ein modernes Kohlekraftwerk erreicht einen elektrischen Wirkungsgrad von über 45 %. Durch effektive Kraft-Wärme Kopplung kann der Gesamtwirkungsgrad des Kraftwerks (Strom + Wärme) auf rund 80% gesteigert werden. Ein noch höherer Wirkungsgrad kann prinzipiell durch erhöhte Betriebstemperatur und -druck erreicht werden. Aktuell wird das Ziel verfolgt, eine Betriebstemperatur von 700 °C zu realisieren. Hierzu müssen erhebliche Forschungsanstrengungen in den **Werkstoff- und Materialwissenschaften** unternommen werden, da die gegenwärtig verfügbaren Werkstoffe chemisch und mechanisch nicht ausreichend robust sind. Dieselben Anforderungen gelten für die Erhöhung des Wirkungsgrades von modernen Gas- und Dampfturbinenkraftwerken.

Konventionelle Kraftwerke haben eine Lebensdauer von rund 30 Jahren. Die Erneuerung des Kraftwerksparks erfolgt daher langsam aber stetig. So sind hocheffiziente, neue und weniger effiziente, ältere Technologien parallel im Einsatz. Geschickte gewählte Anreize könnten zu einem beschleunigten Austausch existierender Kraftwerke führen. Hier sind systemische Forschungsansätze erforderlich, um die **Effektivität von weltweit wirksamen Anreizsystemen** in all ihren Konsequenzen modellieren und vorhersagen zu können. Dazu gehört beispielsweise auch die Analyse der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Kraftwerkshersteller, die weltweit eine führende Stellung einnehmen.

Im Falle der Kraft-Wärme Kopplung in Kraftwerken wird **Abwärme** effizient genutzt. Verwendet werden **thermische Speicher** auf Wasserbasis, die zur Versorgung mit Raumwärme und Warmwasser eingesetzt werden. In Hochtemperaturanwendungen (um 1000°C), wie z. B. in der Glasindustrie, kommen keramische Speichermaterialien sowie Gleitdruck- oder Ruthspeicher zur Bereitstellung von Spitzenlastdampf zum Einsatz. In vielen anderen Anwendungen, z. B. in der chemischen Industrie, entstehen bedeutende Wärmemengen, die in der Regel zwar abgeführt, aber nicht weiter genutzt werden. Daher versprechen Techno-

logien, die in der Lage sind, Wärmemengen auch bei geringem Temperaturgradienten effizient zu nutzen, ein erhebliches Potenzial. Ziel weiterer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sollte die Entwicklung **thermo-chemischer Speicher** sein, die verschiedene Temperaturbereiche abdecken.

Auf dem **thermoelektrischen Effekt** beruht die direkte Umwandlung eines Temperaturgradienten in elektrischen Strom. Dies ist zur Zeit die einzige Technologie, die prinzipiell diese Möglichkeit eröffnet. Ihr Wirkungsgrad ist bisher jedoch begrenzt, und es werden keine kurzfristigen Durchbrüche erwartet. Dennoch sollte diese Technologie unterstützt werden, da sie als einzige die direkte Nutzung von Abwärme als Strom ermöglicht und längerfristig zu erheblichen energetischen Einsparungen führen könnte. Hier ist sowohl Forschung im Grundlagenbereich erforderlich, wo es um das Verständnis des Zusammenhangs der thermoelektrischen Eigenschaften mit den atomaren und strukturellen Parametern der Materialien geht, als auch die empirische Entwicklung neuer Materialien mit verbesserten Leistungsdaten, insbesondere verbesserter energetischer Effizienz. Für die Anwendung ist die Kostensenkung entsprechender Systeme von hoher Bedeutung; dazu müsste die Materialbasis auf kostengünstigere Ausgangsstoffe umgestellt werden, die zudem mit geringeren gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen verbunden sein könnten.

Mobile Anwendungen, mit Ausnahme des Schienenverkehrs, der zum großen Teil elektrifiziert ist, basieren hauptsächlich auf flüssigen Kraftstoffen, die sich durch relativ hohe Energiedichte und gute Transportierbarkeit auszeichnen und die heute ganz überwiegend aus Erdöl gewonnen werden.

Schienenverkehr

Der Schienenverkehr ist in Deutschland zum großen Teil elektrifiziert. Dieselgetriebene Antriebe kommen nur in Strecken mit niedrigem Verkehrsaufkommen oder in speziellen Anwendungen (z. B. Bau- und Rangierbetrieb) zum Einsatz. Die Bahn betreibt ihre eigene Stromerzeugung über konventionelle Kraftwerke und ihr eigenes Strom-



netz. Fortschritte der Kraftwerktechnologie kommen daher ebenfalls der Gesamtenergiebilanz des Schienenverkehrs zu Gute. Moderne Züge sind bereits heute mit Technologien ausgestattet, die es erlauben, Bremsenergie wieder ins Netz einzuspeisen. Gleichzeitig wächst der Energieverbrauch aber durch die Tendenz, zunehmend Züge mit hohen Geschwindigkeiten einzusetzen.

Fortschritte im Schienenverkehr sind hauptsächlich im Bereich der **Werkstoffwissenschaften** zu erwarten, die zu leichteren Zügen, verbessertem Rollverhalten und damit zu geringerem Energieverbrauch führen sollten. Das größte Einsparpotenzial liegt jedoch sektorübergreifend in einer Verschiebung des automobilgebundenen Personen- und Güterverkehrs auf die Schiene. Hierzu sollten Konzepte für eine stärker bedarfsausgerichtete Konzeption des Schienenverkehrs erarbeitet werden. Grundsätzlich stehen solche Konzepte immer in Zusammenhang mit der **soziologisch-psychologischen Frage nach dem Mobilitätsbedürfnis** und dessen realen Manifestationen im Sinn der Nachfrage einer Gesellschaft nach Mobilitätsleistungen (private PKW, Car Sharing, öffentlicher Nah- und Fernverkehr, Ersatz von Mobilität durch neue Kommunikationstechnologien). Die Frage, inwieweit die Arbeits- und Lebenswelt verschränkt werden oder voneinander

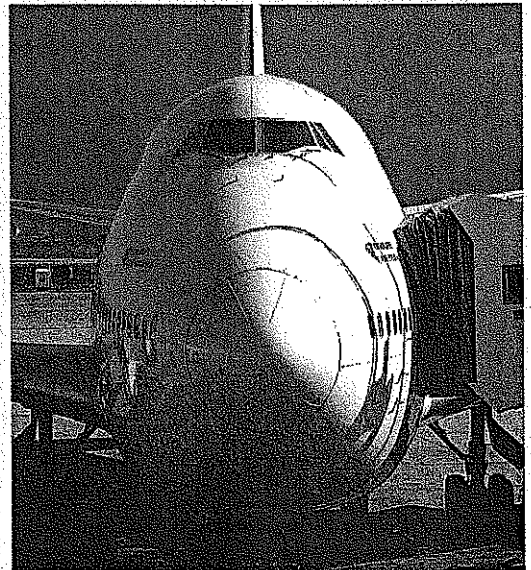
getrennt bleiben, ist von erheblicher Bedeutung für den Energieverbrauch einer Gesellschaft.

Flugverkehr

Der Flugverkehr bedient sich ausschließlich des Treibstoffs Kerosin. Es gibt gegenwärtig keine überzeugenden Konzepte, die auf mittlere Sicht zu einem anderen Treibstoff führen könnten. Die damit verbundene Abhängigkeit vom Rohöl lässt sich in gewissen Grenzen durch den Einsatz von biogenen oder künstlichen Kraftstoffen mindern. Forschungsbedarf besteht auch hier im Bereich der **Werkstoff- und Materialwissenschaften** mit dem Ziel leichter Materialien, beziehungsweise verbesserter Materialien für Turbinen, und in neuen aerodynamischer Konzepte. Einsparungen lassen sich ebenfalls durch eine **systematische Analyse und Verbesserung bedarfsorientierter Verkehrsplanung** erreichen. Derzeit sind Flugreisen oft preiswerter als Bahnreisen, wodurch der Anreiz zu Fernreisen selbst für Kurzurlaube zunimmt.

Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr basiert zum großen Teil auf Verbrennungsmotoren, die schweres Dieselöl und Schweröl einsetzen. Die Maschinen erfüllen die



Doppelrolle des Antriebs und des Generators für die Stromversorgung des Schiffes. Der Schwerpunkt der Aktivitäten liegt hier in der Entwicklung **alternativer Antriebskonzepte** und gegebenenfalls deren parallele Verwendung. Im Schiffbau liegt weiterhin ein Potenzial in der effizienten Nutzung der Abwärme. Interessant sind ebenfalls Entwicklungen im Bereich der Supraleitung, deren Einsatz wesentlich kompaktere Schiffsmotoren ermöglicht. Diese befinden sich gegenwärtig im Demonstrationsstadium, und gegebenenfalls lassen sich diese Erkenntnisse auch auf einen Einsatz im Schienenverkehr übertragen.

Automobil

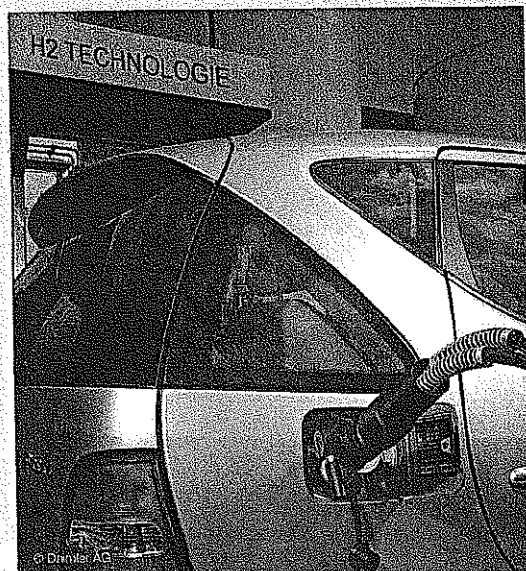
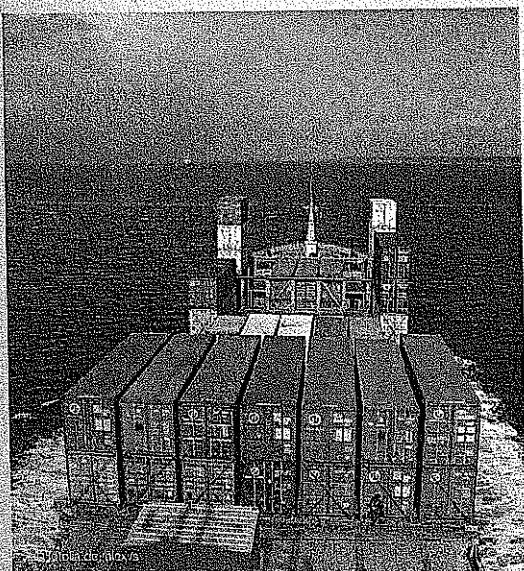
Der Autoverkehr ist der Sektor, in dem derzeit fossile Energie stark dominiert. Allerdings werden hier auch am schnellsten Probleme in Hinblick auf Verfügbarkeit erwartet. Außerdem erscheint es kaum möglich, CO₂ aus mobilen Quellen wie Autos abzutrennen. Dieser Bereich der Mobilität hat daher auch in einem fossilen Energiesystem hohen Forschungsbedarf zur Vorbereitung auf bevorstehende einschneidende Änderungen. Ein wesentlicher Teil des Automobilverkehrs wird auf **CO₂-neutrale Energiequellen** umgestellt werden müssen, durch **Biomasse** allein wird dies nicht zu leisten sein. Daher ist auch in einem fossilen Ener-

giesystem **Elektromobilität** – mit den oben bereits formulierten Forschungserfordernissen – von entscheidender Bedeutung, wobei die CO₂-Emissionen zentral anfallen würden – bei der Produktion von elektrischer Energie oder von Wasserstoff, der im Auto in einer Brennstoffzelle verstromt würde. Zentral anfallende Emissionen ließen sich dann abtrennen und speichern (siehe unten).

Die Verwendung fossiler Energieträger ist inhärent mit der Produktion von CO₂, dem Endprodukt der Verbrennung, verbunden. Je nach Kohlenstoff/Wasserstoff-Verhältnis entstehen unterschiedliche Mengen an CO₂. Die seit der industriellen Nutzung von fossilen Energieträgern stetig ansteigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist ein wesentlicher Faktor im globalen **Klimawandel**. Eine möglichst umfassende Reduzierung der Freisetzung von CO₂ in die Atmosphäre bildet daher die wesentliche Voraussetzung für die zukünftige energetische Nutzung fossiler Energieträger.

Kohlendioxid-Management

Eine mögliche, kurzfristige Strategie im Rahmen von fossilen Energieträgern ist die Umstellung von kohlenstoffreichen fossilen Energieträgern (Kohle) auf möglichst wasserstoffreiche und kohlenstoffarme (Erdgas). Eine solche Umstellung führt zu



III FORSCHUNGSPOTENZIALE

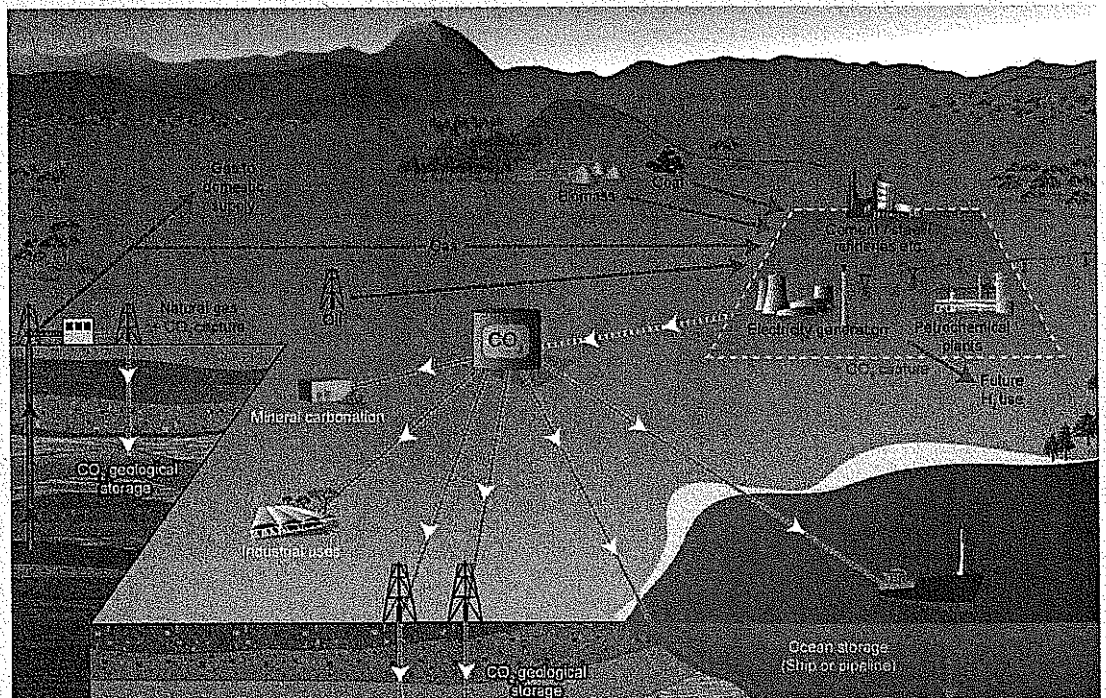
veränderten Interdependenzen und sollte im Zusammenhang der Versorgungssicherheit, des Klimateffektes und der technischen Möglichkeiten systemisch analysiert werden. Gleichzeitig bedeutet die Umstellung auf Erdgas aufgrund der beschränkten Reserven nur eine Aufschiebung der Emissionen von CO_2 und bietet keine tragfähige langfristige Lösung der Klimaproblematik.

Auch in einem durch fossile Energieträger geprägten Energiesystem wird man andere Quellen, wie etwa Biomasse, soweit als möglich nutzen, insbesondere da diese in erster Näherung als klimaneutral angesehen werden können. Moderne Kohlekraftwerke sind in der Lage, eine mäßige Beimischung von Biomasse ohne Einschränkung des Wirkungsgrades zu verkraften. Dies hängt hauptsächlich mit dem variierenden Wasseranteil in der **Biomasse** zusammen. Biogas kann ohne weiteres in modernen Anlagen verfeuert werden. Dabei können Erfahrungen aus der Trocknung von Braunkohle auf Biomasse übertragen werden. Die wesentliche Schwierigkeit für eine umfassende Verwendung von Biomasse und damit

der Schwerpunkt von Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet liegen in den **komplexen logistischen Herausforderungen der Produktionskette**, vom Anbau über Wachstum zur Ernte, Vorbehandlung und Transport.

Eine Schlüsseltechnologie, sowohl für die Wasserstoffproduktion, als auch zur „ CO_2 -freien Verbrennung“, ist die **Vergasung**. Dabei wird kohlenstoffhaltiges Material (von Kohle bis Biomasse) mit Wasser zu einem Synthesegas, das im Wesentlichen aus Wasserstoff und CO besteht umgesetzt. Das Synthesegas kann zur Produktion von Grundchemikalien oder Kraftstoffen (Fischer-Tropsch-Synthese) eingesetzt werden. Alternativ kann in einem weiteren Schritt, der Shift-Reaktion, mehr Wasserstoff und CO_2 produziert werden. Nach der Abtrennung von CO_2 kann das verbliebene, hauptsächlich aus Wasserstoff bestehende Gas in modernen IGCC-(**I**ntegrated **G**asification **C**ombined **C**ycle) Kraftwerken verbrannt werden.

Diese Kraftwerke sind in kleinerem Maßstab Stand der Technik, jedoch ist noch viel Spielraum für Op-



Schematische Darstellung der geologischen CO_2 -Speicherung (Quelle: GFZ Potsdam)