

Energie

## Klimaschutz und Energieeffizienz

Forschung, Entwicklung und  
Demonstration moderner Energietechnologien

### **Redaktion**

Bundesministerium für Wirtschaft  
und Technologie (BMWi)  
Öffentlichkeitsarbeit/IA8

### **Konzept**

Projektträger Jülich (PtJ)  
in der Forschungszentrum Jülich GmbH

### **Text und Gestaltung**

Mediakonzept, Düsseldorf  
www.mediakonzept.com

### **Titelbild**

Am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung  
(ZSW) in Ulm werden die Gasverteilerstrukturen einer  
Brennstoffzellenkomponente am Rechner modelliert.

### **Druck**

medienHaus PLUMP GmbH, Rheinbreitbach

### **Bildnachweise**

BASF (17, 34), BINE (12, 20, 21, 39), BMW (57), BMWi (5),  
Büro CASA, Aachen (18 oben), MTU Onsite Solutions (54, 55, 56),  
Daimler (58, 59), Dieter Beste (78), DIFK – Deutsches Institut für  
Feuerfest und Keramik (29), DLR (48, 49), EU (80), Ing.-Büro  
f. Umweltfragen, H. v. Reis, Aachen (15), Inco Ingenieurbüro,  
Aachen (18 unten), RWE (67 rechts), Schott (28), Siemens (40, 62,  
64, 65, 66, 67 links, 73), Stadtwerke München (24, 25), Stahl-  
Zentrum (30, 33, 36), Thomas Riehle Architekturfotograf (19), TU  
Darmstadt (14), TU Dresden (69), TUBA Freiberg (72), Ulrich  
Zillmann (Titel, 10, 26, 42, 47, 50, 51, 60), Variotec (16), Vattenfall  
(22, 23, 70, 74), WS Wärmeprozess-technik (31), ZSW (53)

### **Herausgeber**

Bundesministerium für Wirtschaft  
und Technologie (BMWi)  
Öffentlichkeitsarbeit  
10115 Berlin  
www.bmw.de

### **Stand**

November 2008



Das Bundesministerium für Wirtschaft und  
Technologie ist mit dem audit berufundfamilie®  
für seine familienfreundliche Personalpolitik  
ausgezeichnet worden. Das Zertifikat wird von  
der berufundfamilie eGmbH, einer Initiative der  
Gemeinnützigen Hertie-Stiftung, verliehen.



Energie

# Klimaschutz und Energieeffizienz

Forschung, Entwicklung und  
Demonstration moderner Energietechnologien



# Inhalt

<b>Vorwort</b> . . . . .	5
Die Herausforderungen für die Energieforschung . . . . .	6
<b>Rationelle Energienutzung</b> . . . . .	9
„Energiebilanzierung wird immer komplexer“ . . . . .	11
Energieoptimiertes Bauen . . . . .	12
Energieeffiziente Stadt . . . . .	22
„Wir sparen mehr als 30 Prozent Erdgas ein“ . . . . .	27
Effiziente Energienutzung in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen . . . . .	28
Effiziente Stromnutzung, Speicher . . . . .	37
<b>Effiziente Energieumwandlung</b> . . . . .	41
„Brennstoffzellen sind eine attraktive Alternative“ . . . . .	43
Brennstoffzellen und Wasserstoff. . . . .	44
„Es gilt, Kohlendioxid abzutrennen und zu speichern“ . . . . .	61
Moderne Kraftwerkstechnologien . . . . .	62
<b>Querschnittsmaßnahmen</b> . . . . .	76
Energiesystemanalyse und das Projekt Eduar&D . . . . .	77
Informationsverbreitung BINE-Informationssdienst . . . . .	78
Internationale Zusammenarbeit in der Energieforschung . . . . .	79
<b>Perspektiven der Energieforschung für mehr Energieeffizienz</b> . . . . .	81
<b>Förderinformationen</b> . . . . .	84



# Vorwort

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts werden die Herausforderungen für die langfristige Energieversorgung immer deutlicher: Das wirtschaftliche Wachstum in vielen Ländern der Welt, vor allem in den Schwellenländern wie China oder Indien, hat zu einer enormen zusätzlichen Energienachfrage geführt, die offensichtlich die Möglichkeiten einer raschen Erweiterung des Energieangebotes übersteigt. Das wirkt auf lange Sicht in Richtung hoher Öl- und Gaspreise, die Wirtschaft und Verbraucher belasten und zu Risikofaktoren für Wachstum und Beschäftigung in Deutschland werden können. Schließlich steigt durch die wachsende Verbrennung von Kohle, Öl und Gas der Ausstoß von Treibhausgasen und macht Maßnahmen zum Schutz der Erdatmosphäre immer dringlicher.

Diese Fakten belegen, dass wir den Umbau unserer Energieversorgung jetzt noch schneller vorantreiben müssen. Dabei rückt die Frage des effizienten Umgangs mit Energie in den Mittelpunkt der Politik. Wir wissen, dass die Steigerung der Energieeffizienz die wirksamste und kostengünstigste Maßnahme für eine sichere und klimaverträgliche Energieversorgung ist. Sie ist auch die beste Antwort, um hohen Energiepreisen entgegenzuwirken.

Verbesserungen der Energieeffizienz hängen von vielen Faktoren ab, langfristig vor allem aber vom technischen Fortschritt und dem Einsatz moderner Technik. Insofern ist die Entwicklung innovativer Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz das strategische Element jeder guten Energiepolitik. Neue Technologien fallen aber nicht vom Himmel. Sie sind das Ergebnis langjähriger Forschungsarbeiten. Nur was Forschung und Entwicklung im Laufe der Jahre hervorbringen, kann seinen Weg zum Markt finden. Das macht jetzt gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor allem in den Bereichen dring-

lich, in denen die großen Energieeinsparpotentiale liegen und in denen man durch moderne Technik übermäßige Belastungen von Wirtschaft und Verbrauchern begrenzen kann.

Unter dieser Vorgabe hat das BMWi seine Fördermaßnahmen im Bereich der nicht-nuklearen Energieforschung noch einmal finanziell verstärkt und mit dem „Technologieprogramm Klimaschutz und Energieeffizienz“ neu gebündelt. Im Zentrum des Programms stehen die traditionellen Fachbereiche wie „Moderne Kraftwerkstechnologien“, „Brennstoffzelle, Wasserstoff“ und „Energieoptimiertes Bauen“. Hinzugekommen sind aber auch neue Förderschwerpunkte zu Themen wie „Energieeffiziente Stadt“, „Effiziente Stromnutzung und Speicher“ sowie „Hochtemperatursupraleitung“.

Alle diese Fördermaßnahmen sind Teil einer Gesamtstrategie zur Verbesserung der Energieeffizienz und werden ergänzt und flankiert durch weitere Programme des BMWi. Dazu gehören das Verkehrsforschungsprogramm, Maßnahmen im Rahmen des nationalen Energieeffizienz-Aktionsplanes oder auch Einzelinitiativen, wie das Programm „E-Energy“, das darauf abzielt, die effiziente Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Elektrizität durch innovative Informations- und Kommunikationstechnologien zu unterstützen.

Die Förderung von Innovation und modernen Energietechnologien gehört zu den Politikfeldern, die weiter gestärkt werden müssen, damit Deutschland die energiewirtschaftlichen Herausforderungen meistern kann. Die in dieser Broschüre zusammengestellten Forschungs- und Demonstrationsprojekte zeigen, dass wir auf einem guten Weg sind.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

## Die Herausforderungen für die Energieforschung

Eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung ist das Rückgrat jeder modernen Volkswirtschaft, um Wachstum, Beschäftigung und Wohlstand zu sichern. Ohne Energie gibt es keine Entwicklung. Und wir wissen: Ohne eine Umstrukturierung der Energieversorgung gibt es keinen Fortschritt beim Klimaschutz.

Die Bundesregierung hat mit der Verabschiedung des Integrierten Energie- und Klimaprogramms am 5. Dezember 2007 den energiepolitischen Kurs für die kommenden Jahre festgelegt. Die strategischen Grundlinien dieses Programms werden durch drei Kernziele bestimmt, die bis zum Jahr 2020 reichen:

- ▶ eine Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz,
- ▶ ein wachsender Beitrag der erneuerbaren Energien zur Primärenergiebedarfsdeckung sowie
- ▶ eine Absenkung der Emission von treibhausrelevanten Spurengasen.

Die Vorgabe für die Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz ist das Herzstück der Politik der Bundesregierung. Ohne eine Verbesserung der Energieeffizienz und die damit verbundene Absenkung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland wird es nicht möglich sein, den angestrebten Ausbau der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung im Jahr 2020, im Strombereich auf 25 bis 30 Prozent und im Wärmebereich auf 14 Prozent, zu erreichen. Ohne eine Absenkung des Primärenergieverbrauchs ist auch das Ziel, die Treibhausgas-Emissionen bis 2020 um bis zu 40 Prozent zu vermindern, wenig realistisch.

Ziel der Bundesregierung bei der Verbesserung der Energieeffizienz ist es, den spezifischen Primärenergieverbrauch – das ist der Primärenergieverbrauch, der nötig ist, um eine Einheit Bruttoinlandsprodukt zu erzeugen – bis 2020 gegenüber dem Niveau von 1990 zu halbieren. Betrachtet man die bereits erzielten Fortschritte von 1990 bis 2007, so ergibt sich daraus, dass man den spezifischen Primärenergieverbrauch von heute bis 2020 um mindestens 2,7 Prozent pro Jahr absenken muss. Andernfalls wird das Energieeinsparziel der Bundesregierung verfehlt. Und das wiederum hätte zur Konsequenz, dass auch

die anderen energie- und umweltpolitischen Ziele der Bundesregierung Gefahr laufen, außer Reichweite zu geraten.

Eine Verminderung des spezifischen Primärenergieverbrauchs um 2,7 Prozent pro Jahr ist ein überaus anspruchsvolles Ziel. Es liegt weit außerhalb der historischen Erfahrungen. Seit 1980 hat es in Deutschland keinen vergleichbaren Zeitraum gegeben, in dem es gelungen wäre, den spezifischen Primärenergieverbrauch über einen Durchschnittswert von 1,8 Prozent pro Jahr hinaus zu senken. Die 1,8-Prozent-Marke bildet insofern einen Benchmark, an dem man das aktuelle politische Ziel messen kann. Mit Blick auf die Auswahl und Dimensionierung der Maßnahmen zur Umsetzung der 2,7-Prozent-Effizienzverbesserung ist darüber hinaus zu beachten, dass sich der Prozess der Verringerung des spezifischen Primärenergieverbrauchs im Trend verlangsamt. Dies entspricht den Erwartungen bei den bereits erreichten sehr hohen Effizienzstandards in Deutschland. Die Herausforderung besteht darin, diesen Trend zu durchbrechen und die Einsparprozesse zu beschleunigen.

### Das Integrierte Energie- und Klimaprogramm der Bundesregierung

Das Bundeskabinett hat am 5. Dezember 2007 das „Integrierte Energie- und Klimaprogramm“ (IEKP) beschlossen. Das IEKP ist ein 29 Maßnahmen umfassendes Paket, vor allem zugunsten von mehr Energieeffizienz und mehr erneuerbaren Energien. So soll z.B. der Stromanteil aus der Kraft-Wärme-Kopplung von heute 12 auf 25 Prozent in 2020 erhöht werden, der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion von derzeit rund 14 auf 25 bis 30 Prozent in 2020 ausgebaut werden und deren Anteil an der Wärmeversorgung auf 14 Prozent steigen. Mit dem IEKP hat die Bundesregierung wichtige Weichen für eine hochmoderne, sichere und klimaverträgliche Energieversorgung in Deutschland gestellt. Zugleich hat sie die Maßnahmen für einen ehrgeizigen, intelligenten und effizienten Klimaschutz festgelegt. Angestrebt wird ein internationales Klimaschutzabkommen nach 2012. Die Bundesregierung bietet als deutschen Beitrag hierfür an, die Emissionen bis 2020 um 40% unter das Niveau von 1990 zu reduzieren. Dieses Angebot steht unter der Voraussetzung, dass die Europäische Union im selben Zeitraum ihre Emissionen um 30% gegenüber 1990 reduziert und andere Staaten vergleichbar ehrgeizige Ziele übernehmen. Der Schlüssel zur Erreichung der Ziele des IEKP sind innovative Energietechnologien, und zwar auf Angebotsseite, dort wo Energie bereitgestellt wird, und auf der Nachfrageseite, also dort, wo Energie genutzt wird. Die Bundesregierung hat daher Forschung und Innovation zu einem Schwerpunkt des IEKP gemacht (Maßnahme 25). Das „Technologieprogramm Klimaschutz und Energieeffizienz“ des BMWi ist ein zentraler Bestandteil dieser Maßnahme.



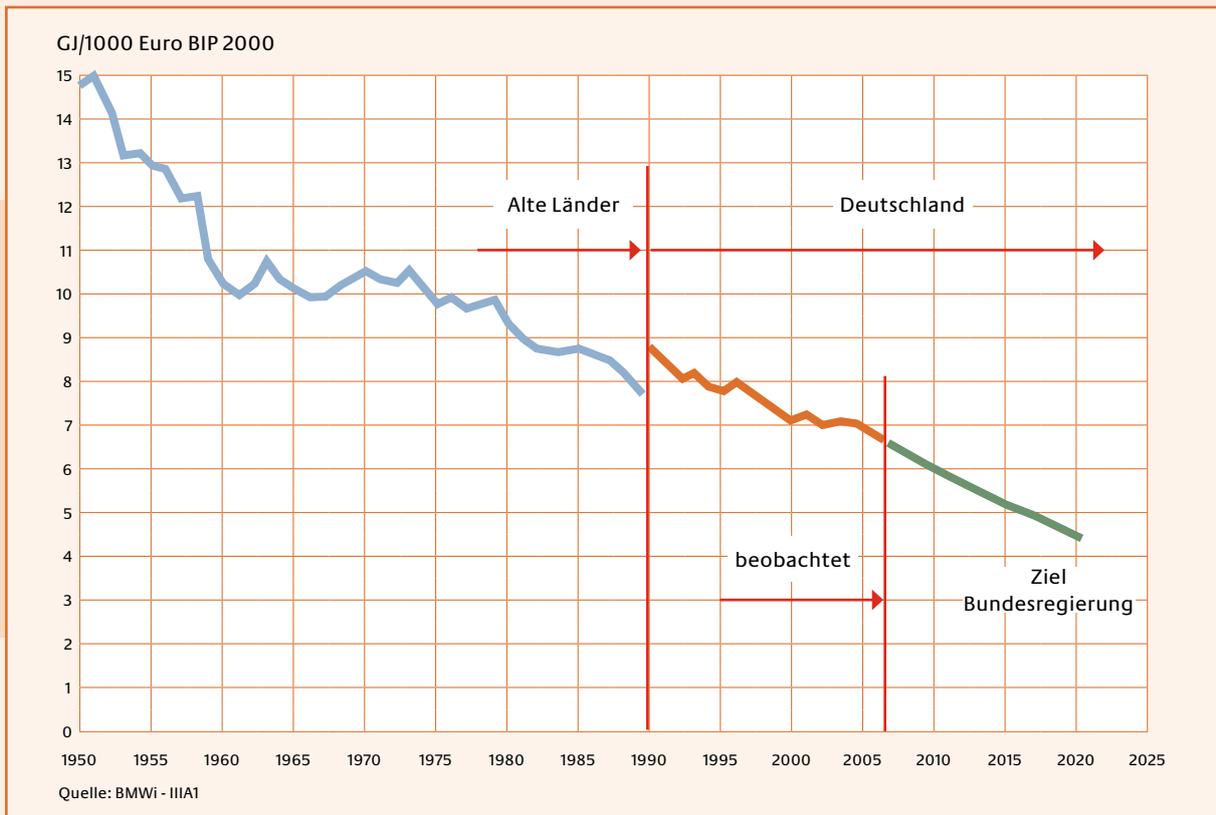


Schaubild zum Rückgang des spezifischen Primärenergieverbrauchs in Deutschland: Bei einem Anstieg der Wirtschaftsleistung im Jahr 2007 um 2,5 Prozent gegenüber dem Vorjahr wurde der spezifische Primärenergieverbrauch (unbereinigt, das heißt ohne Berücksichtigung von Temperatureinflüssen und Lagerbestandseffekten) um rund 7,7 Prozent gesenkt. Bereinigt um die Sondereffekte ergibt sich immer noch eine Verbesserung um rund 5 Prozent. Auch in den absoluten Zahlen spiegelt sich der Weg zu einer modernen, effizienten und nachhaltigen Energieversorgung: Mit 13.878 Petajoule ist der Energieverbrauch im Jahr 2007 auf das niedrigste Niveau seit der Wiedervereinigung abgesunken. Gegenüber dem Vorjahr beträgt der Rückgang 4,8 Prozent, gegenüber 1990 beträgt er 6,9 Prozent.

Es liegt auf der Hand, dass die Umsetzung der Vorgabe der Bundesregierung zur Verbesserung der Energieeffizienz auf einen tief greifenden Umstrukturierungsprozess hinausläuft. Langfristiges wirtschaftliches Wachstum bei sinkendem Energieeinsatz ist möglich, impliziert aber notwendigerweise Veränderungen, Strukturwandel, Investitionen und damit zunächst Kosten.

Die Bundesregierung trifft Vorsorge, dass dieser Umstrukturierungsprozess die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft nicht überfordert und die Belastungen der Verbraucher in Grenzen gehalten werden. Dabei spielt der beschleunigte Einsatz moderner, hoch effizienter und kostengünstiger Energietechnologien eine zentrale Rolle. Die Bundesregierung trägt dem Rechnung, indem sie in ihrem Integrierten Energie- und Klimaprogramm bei „Energieforschung und Innovation“ einen besonderen Schwerpunkt setzt.

Forschung, Entwicklung und Markteinführung neuer Energietechnologien sind in erster Linie eine

Aufgabe der Wirtschaft. Die Bundesregierung unterstützt jedoch die Wirtschaft in ausgewählten Bereichen, vor allem dort, wo die Entwicklung neuer Energietechnologien als notwendig erachtet wird, die Unternehmen aber wegen besonders hoher Risiken oder langer Entwicklungszeiten keine oder keine ausreichenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchführen können. Die anspruchsvollen politischen Vorgaben bei Klimaschutz und Energieeffizienz und die komplexe energiewirtschaftliche Ausgangslage legen eine zeitlich differenzierte, klug aufeinander abgestimmte und umfassend angelegte Energieeinspar- und Technologiepolitik nahe. Die Bundesregierung verfolgt konsequenterweise einen breit angelegten Ansatz, der auf eine Verbesserung der Energieeffizienz – von der Energiegewinnung über die Energieumwandlung und den Energietransport bis zur endgültigen Energienutzung beim Endverbraucher – abzielt und auf zwei sich ergänzende Strategielinien aufbaut:

► Um die Dynamik der Energieeinsparprozesse zu erhalten bzw. zu beschleunigen, enthält das

Integrierte Energie- und Klimaprogramm eine Vielzahl auch kurzfristig wirksamer Maßnahmen. Hervorzuheben sind insbesondere Vorgaben zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, die Novelle der Energieeinsparverordnung, die Förderprogramme zur energetischen Sanierung von Gebäuden und der sozialen Infrastruktur sowie neue Leitlinien zur Beschaffung energieeffizienter Produkte und Dienstleistungen für Bundeseinrichtungen.

▶ Parallel dazu wird die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energieeffizienztechnologien verstärkt, um damit die Voraussetzungen für eine wirtschaftlich gut abgesicherte Absenkung des

spezifischen Primärenergieverbrauchs auf mittlere Sicht zu schaffen. Das geschieht vor allem durch eine Verstärkung der markt- und anwendungsnahen Projektförderung des BMWi.

Mit den Beschlüssen der Bundesregierung zu dem Integrierten Energie- und Klimaprogramm hat das BMWi seine Förderaktivitäten im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms auf dem Gebiet moderner Energietechnologien unter dem Namen „Technologieprogramm Klimaschutz und Energieeffizienz“ neu gebündelt. Für diesen Bereich stehen in den kommenden vier Jahren (2008 bis 2011) rd. 446 Millionen Euro zur Verfügung.

Im Zentrum des BMWi-Förderprogramms „Technologieprogramm Klimaschutz und Energieeffizienz“ stehen dabei die folgenden Fachbereiche:

- ▶ Moderne Kraftwerkstechnologien (inkl. CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung – COORETEC)
- ▶ Kraft-Wärme-Kopplung, Fernwärme
- ▶ Brennstoffzelle, Wasserstoff
- ▶ Effiziente Stromnutzung, Speicher (inkl. der neuen Initiative Hochtemperatursupraleitung)
- ▶ Energieoptimiertes Bauen (inkl. der neuen Initiativen „Energieeffiziente Stadt“ und „Energieeffiziente Schule“)
- ▶ Energieeffizienz in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Flankiert werden die Aktivitäten in diesen Schwerpunkten durch energiebezogene Fördermaßnahmen bei der Multimediaforschung („E-Energy: IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft“), den Verkehrstechnologien (etwa Alternative Antriebe und Kraftstoffe) sowie Forschungsarbeiten am DLR (Kraftwerkstechnologie, Brennstoffzelle).

Die politischen Herausforderungen zu Beginn des 21. Jahrhunderts werden bestimmt durch Klimaschutz und Energieeffizienz. Die Antwort auf diese Herausforderungen lautet: Mehr Forschung und Entwicklung sowie beschleunigter Einsatz moderner Energietechnologien.



#### Das 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

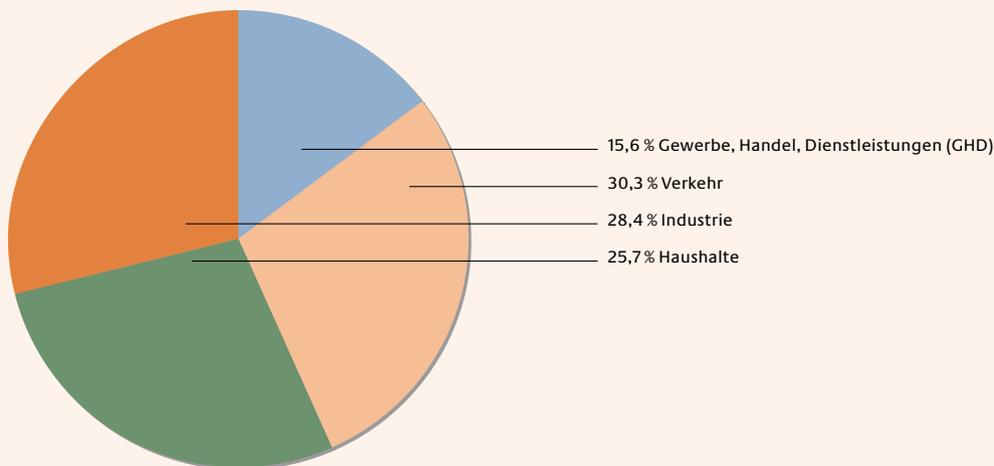
Die Bundesregierung legt die Ziele und Schwerpunkte ihrer Energieforschungspolitik sowie die zugehörigen Fördermechanismen in einem mehrjährigen Energieforschungsprogramm fest. Zum 1. Januar 2006 ist das 5. Energieforschungsprogramm „Innovation und neue Energietechnologien“ in Kraft getreten. Das Programm, das unter Federführung des BMWi (zuständig für die Energieforschungspolitik der Bundesregierung) gemeinsam mit BMU, BMELV und BMBF erarbeitet wurde, bildet die Grundlage für die Förderpolitik des Bundes in den kommenden Jahren. Ziel ist es, durch Innovation und technischen Fortschritt den Übergang zu einer nachhaltigen Energieversorgung weiter voran zu treiben. Kurz- und mittelfristig leistet das Programm einen konkreten Beitrag zur Erfüllung aktueller politischer Vorgaben, vor allem der Sicherstellung eines ausgewogenen Energiemixes, der Steigerung der Energieproduktivität, der Erhöhung des Beitrags der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch sowie der Reduktion der Treibhausgasemissionen. Langfristig trägt es dazu bei, durch Sicherung und Erweiterung der technologischen Optionen die Reaktionsfähigkeit und Flexibilität der Energieversorgungssysteme zu verbessern. Mit den Beschlüssen der Bundesregierung zum IEKP hat die Bundesregierung ihre Förderaktivitäten im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms neu akzentuiert und verstärkt. So hat das BMWi seine Förderaktivitäten auf dem Gebiet nicht-nuklearer Energietechnologien unter dem Namen „Technologieprogramm Klimaschutz und Energieeffizienz“ neu gebündelt. Insgesamt wird die Bundesregierung in den Jahren 2008 bis 2011 im Rahmen der Energieforschung rund 2,1 Mrd. € für die Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien bereitstellen. Damit leistet das Energieforschungsprogramm einen wichtigen Beitrag zur notwendigen Anpassung und Modernisierung der deutschen Energieversorgung. Im übrigen stärkt das Programm Wachstum und Beschäftigung in Deutschland und bietet über den Export von hocheffizienten Energietechnologien einen wirksamen Beitrag zum global notwendigen Schutz der Erdatmosphäre.

# Rationelle Energienutzung

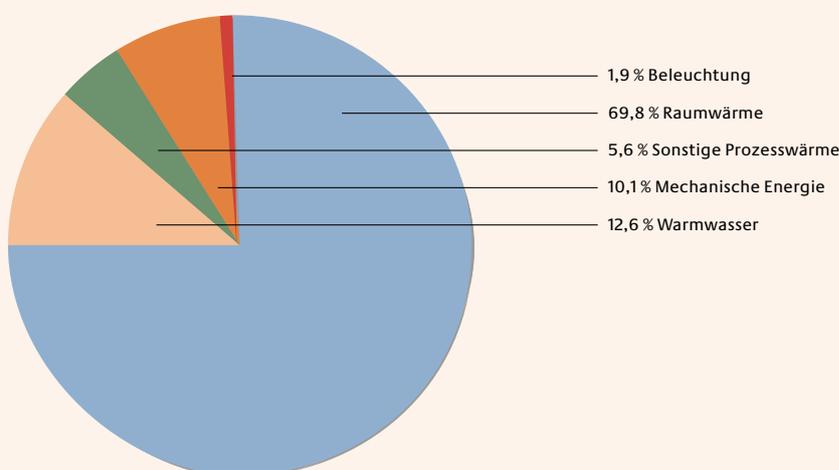
Neben verhaltensorientierten Maßnahmen und einer verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien ist es vor allem die Erhöhung der Effizienz der Energieumwandlung und Energienutzung, mit der der Übergang zu einer nachhaltigen Energiezukunft ermöglicht wird. Hierfür innovative Technologien, Produkte und Konzepte zu entwickeln, ist Aufgabe der Energieforschung. Eine wichtige Rolle spielen hierbei das energieoptimierte Bauen für Wohnen und Arbeiten und eine rationellere Nutzung der Energien in Altbauten, denn

die Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich ist einer der Schlüssel zur Lösung unserer Energieprobleme. Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Energieeffizienzerhöhung in der Industrie und im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, da beide Verbrauchssektoren gemeinsam den höchsten Energieverbrauch aufweisen. Zudem hat der Elektrizitätssektor, darin eingeschlossen leistungsfähige Stromspeicher, eine große Bedeutung für die weitere Entwicklung der Energieversorgung.

Verteilung des Endenergieverbrauchs in Deutschland 2007 auf verschiedene Verbrauchssektoren



Verteilung des Endenergieverbrauchs privater Haushalte nach Anwendungsbereichen



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Stand: 26.09.2008

Die beiden Grafiken verdeutlichen, dass besonders auch die privaten Haushalte Potenzial für eine Steigerung der Energieeffizienz haben. Bei einem Anteil von knapp 26 Prozent am Endenergieverbrauch in Deutschland entfallen hier fast 70 % auf die Raumheizung.



Neben bautechnischen Fragestellungen beziehen Architekten und Bauplaner zunehmend die Wechselwirkung mit gebäudetechnischen Systemen und Anlagen in ihre energetischen Optimierungsstrategien mit ein, um insgesamt zu einer besseren Energiebilanz zu gelangen. Ein Gespräch mit Dipl.-Ing. Hans Erhorn, Leiter der Abteilung Wärmetechnik des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik in Stuttgart, Holzkirchen und Kassel, und Lehrbeauftragter der Universität Stuttgart.

## „Energiebilanzierung wird immer komplexer“

? Energieoptimierung in Gebäuden, energieeffiziente Stadt – wo stehen wir in Deutschland?

! Wenn es um effiziente Energienutzung in Gebäuden ging, stand noch bis vor wenigen Jahren fast ausschließlich die Optimierung der Heizung im Mittelpunkt. Bei kleineren Wohngebäuden mag eine derartige Betrachtung auch heute noch ausreichend sein, aber bei größeren Bauten wie Schulen oder Bürogebäuden müssen auch die Wirkungen anderer gebäudetechnischer Systeme wie Lüftung, Kühlung oder Beleuchtung in eine energetische Bilanz integriert werden. Um hier zu verlässlichen Parametern für Hersteller, Planer und Anwender zu kommen, haben wir zum Beispiel am Standort unseres Instituts in Holzkirchen ein mehrgeschossiges, modulares Versuchsgebäude für energetische und raumklimatische Untersuchungen errichtet. Hier können wir den Energieeintrag durch die Fassade, den Energieverbrauch, die Beleuchtung oder die raumklimatische Behaglichkeit in Wechselwirkung mit den technischen Anlagen im Detail studieren. Man kann wohl sagen, dass wir im internationalen Vergleich inzwischen bei der Bewertung der Effizienz der Energienutzung in Deutschland eine Spitzenstellung einnehmen.

? Wirkt sich die Integration der Anlagentechnik in die Energiebilanzierung von Gebäuden auf die Technologieentwicklung aus?

! Seitdem wir dazu in der Lage sind, Gebäude energetisch ganzheitlich zu bewerten, das heißt in ihrer Interaktion mit den installierten Anlagen wie Heizungs-, Lüftungs- oder Abschattungssystemen, ist in der Fassaden- und Anlagentechnik geradezu ein Technologieschub zu verzeichnen. So hat zum Beispiel ein Sonnenschutz an einem Gebäude heute nicht mehr nur die eine Funktion, Schatten zu spenden. Inzwischen werden Jalousiesysteme so ausgelegt, dass sie ein Gebäude einerseits optimal über den Tag hinweg mit Tageslicht versorgen, ohne dass etwa die blendende Wintersonne das Ablesen von Computerbildschirmen in Büros beeinträchtigen würde, während andererseits auch die eingestrahlte Solarenergie saisonal in optimaler Weise zur Klimatisierung erschlossen wird. Solche mehrdimensionalen Anforderungen konnten an die Anlagentechnik erst in Folge einer Gesamtenergiebilanz gestellt werden, denn erst nun wurde sichtbar und prüfbar, in welchem Ausmaß sie

die effiziente Energienutzung insgesamt beförderten oder aber beeinträchtigten.

? Ein neuer Markt für die deutsche Industrie?

! Wir können beobachten, dass die Hersteller von gebäudetechnischen Anlagen inzwischen sehr intensiv nach synergetischen Wirkungen zwischen den unterschiedlichen Systemen Ausschau halten. Ein wichtiges Kettenglied ist hier natürlich die Automationstechnik, mit der diese bislang ungenutzten energetischen Potenziale erschlossen werden können. So gelingt es zum Beispiel immer besser, etwa klassische, auf fossilen Energieträgern basierende Heizsysteme energieeffizient mit Systemen zu koppeln, die regenerative Energien wie die Sonneneinstrahlung nutzen.

? In welcher Größenordnung schlägt eine solchermaßen synergetische Energieoptimierung zu Buche?

! Im Bereich der energieeffizienten Schulsanierung haben wir in den letzten Jahren sehr positive und richtungweisende Erfahrungen sammeln können. Dabei zeigte sich, dass es mit den uns heute zur Verfügung stehenden Technologien leicht möglich ist, den Energiebedarf solcher Gebäude um 50 bis 70 Prozent zu senken – und zwar wirtschaftlich umsetzbar. Wenn man bedenkt, dass ein Großteil der 40.000 Schulhäuser Deutschlands in den nächsten Jahren saniert werden muss, kann man ermessen, welches große Energieeinsparpotenzial allein hier schlummert. Wir schätzen es auf rund 7 Millionen Megawattstunden pro Jahr.

? Welchem Trend folgt die Energiebilanzierung?

! Die Energiebilanzräume werden immer größer: Vor etwa vier Jahren begann im Planungsbereich eine Umorientierung. Von der bis dahin üblichen Konzentration auf die Optimierung der Heizungstechnik wurde der Fokus auf die Minimierung des Gesamtenergieverbrauchs der Gebäude neu ausgerichtet. Jetzt machen wir darauf aufbauend einen weiteren Schritt, indem wir die Energieversorgung mit in unsere Betrachtung einbeziehen. Und der nächste Schritt deutet sich schon an: Es geht um die energieoptimierte Stadt. Auch hier geht es auf einer wiederum sehr viel komplexeren Ebene ebenfalls darum, ein Optimum zwischen Energiebedarf einerseits und Energiebereitstellung andererseits zu finden.

## Energieoptimiertes Bauen



Das weltweit größte Bürogebäude nach Passivhaus-Standard entstand in Ulm. Das „Energon“ bietet bei niedrigem Energieverbrauch Behaglichkeit im Sommer wie im Winter. Links ein Blick in das Atrium des Energon.

Die beste Energie ist die, die gar nicht erst benötigt wird. Anders gesagt: Die Steigerung der Energieeffizienz ist eine der wirksamsten und kostengünstigsten Maßnahmen, um die Versorgung zu sichern und das Klima zu schützen.

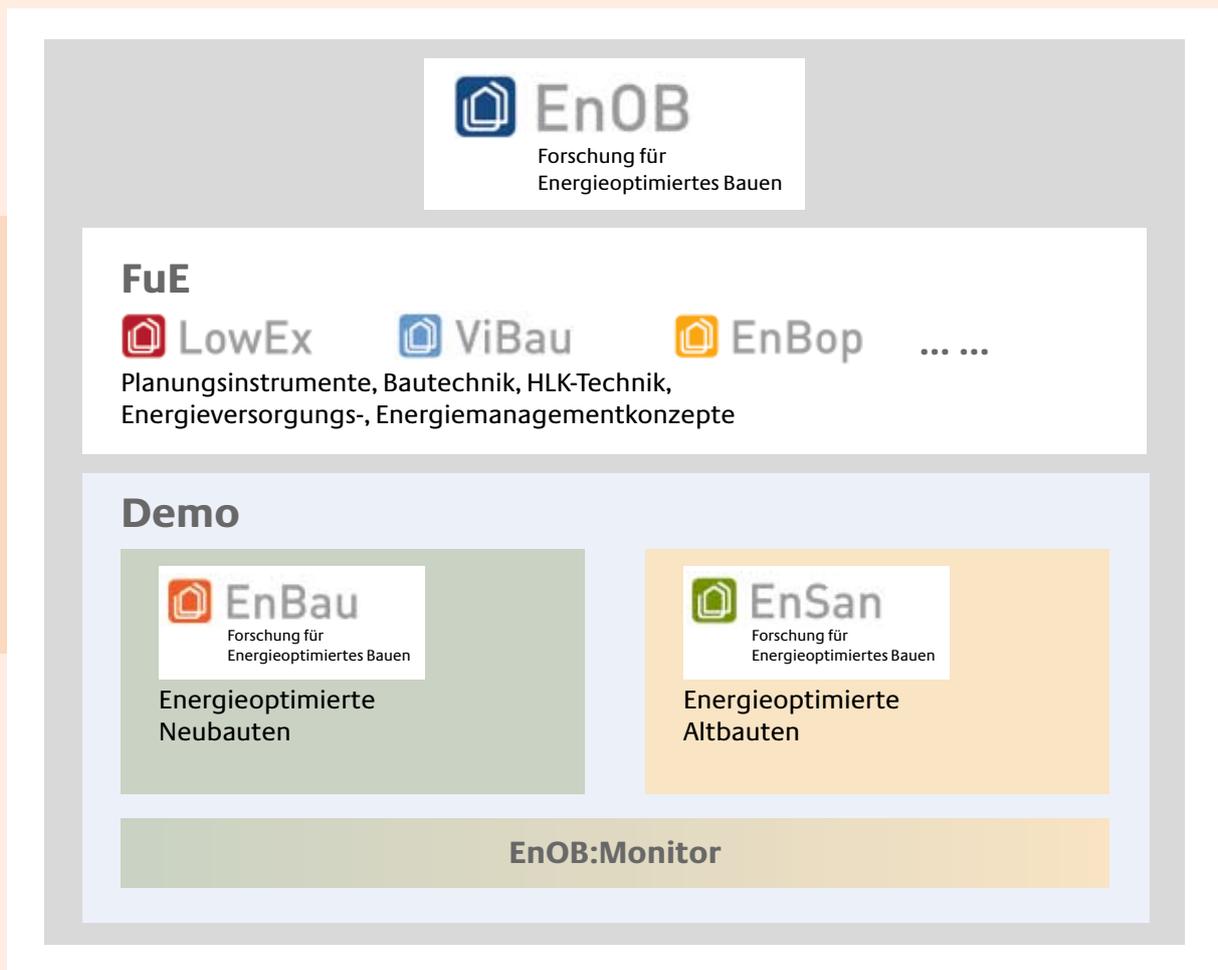
Das gilt insbesondere für Gebäude. Über 80 Prozent aller Gebäude in Deutschland sind Altbauten und wurden zu Zeiten errichtet, als es weder gesetzliche Vorschriften für den Energieverbrauch noch ein Bewusstsein für energieoptimiertes Bauen gab. Kein Wunder also, dass in Wohngebäuden heute mehr als ein Drittel der gesamten Endenergie von Heizung und Warmwasserbereitung verschlungen wird. Würde allein der Wohngebäudebestand energetisch so saniert, dass der Verbrauch auf 35 Prozent sinkt – was technisch leicht realisierbar wäre –, ergäbe sich ein jährliches Einsparpotenzial von 640 Terawattstunden, schätzt das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). „Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bergen damit Potenziale, die um eine Zehnerpotenz höher sind als jene, die erneuerbare Energien überhaupt zur Energieerzeugung beitragen können“, betont IBP-Leiter Professor Gerd Hauser. Zwar werden rund 600.000 Wohnungen in Deutschland in jedem Jahr saniert; doch nur bei jeder dritten, so schätzen Experten, geht es dabei gezielt um eine Minderung des Energieverbrauchs.

Im neuen nationalen Energieeffizienz-Aktionsplan (EEAP) rückt die Bundesregierung daher den

Gebäudesektor besonders in den Fokus. Der EEAP ist die Umsetzung der EU-Richtlinie für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen in deutsches Recht und zeigt auf, durch welche Maßnahmen die Ziele der Richtlinie erreicht werden sollen. Er sieht vor, dass bis 2017 der nationale Endenergieverbrauch um 9 Prozent sinken soll. Von den Maßnahmen, die der Plan nennt, betreffen mehrere den Gebäudebereich, unter anderem:

- ▶ Eine deutliche Verschärfung der energetischen Anforderungen an Gebäude
- ▶ Eine Verstetigung des CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms
- ▶ Verstärkte Investitionen in die Energieeffizienz öffentlicher Gebäude
- ▶ Förderung des Energieeinspar-Contracting für Wohngebäude

Energieoptimiertes Bauen ist keine Vision. Schon heute sind Gebäude kosteneffizient realisierbar, die einen drastisch verringerten Heiz- und Kühlbedarf haben und in denen es sich ohne aufwändige Technik komfortabel wohnen lässt. Möglich wird dies durch die Kombination von vier Instrumenten: sehr guter Wärme- und Sonnenschutz, ausreichende thermische Gebäudespeicherkapazität, eine luftdichte und wärmebrückenfreie



Struktur der Forschungsinitiative „Energieoptimiertes Bauen (EnOB)“ des BMWi ([www.enob.info](http://www.enob.info)).

Hülle sowie eine umfassende Wärmerückgewinnung. Die Forschungsinitiative „Energieoptimiertes Bauen (EnOB)“ des BMWi knüpft hier an. Sie hat zum Ziel, die Entwicklung innovativer Komponenten voranzubringen und in Pilotvorhaben den Primärenergiebedarf von Gebäuden gegenüber dem heutigen Stand der

Technik deutlich zu senken. Bei Sanierung im Nichtwohnungsbaubereich müssen EnOB – Demonstrationsvorhaben die Anforderungen der Energieeinsparverordnung für Neubauten um mindestens 30 Prozent unterschreiten, bei der Sanierung von Wohngebäuden sogar um mindestens 50 Prozent. Außerdem sind die im Rahmen von EnOB entwickelten neuen effizienten Materialien und Systeme für Bautechnik und Technische Gebäudeausrüstung einzusetzen.



#### Dezentrale Heizungspumpe: Klein aber oho!

Zentralheizungen haben einen großen Nachteil: Rund die Hälfte der Pumpenleistung geht durch hydraulische Verluste verloren. Extrem kleine Pumpen, die im Schnitt nur ein Watt Leistung benötigen und jeden Heizkörper einzeln versorgen, sind weit effizienter. Dies zeigen Ergebnisse eines vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens. Die Pumpen sind nicht größer als ein Thermostatventil, arbeiten nahezu geräuschlos und vor allem nur dann, wenn Wärme tatsächlich benötigt wird. Versuche in einem Einfamilienhaus-Altbau zeigten, dass der Brennstoffverbrauch um 20 Prozent, der Strombedarf für die benötigte Pumpleistung gar um bis zu 90 Prozent sinkt. Dezentrale Heizungspumpen sorgen zudem für mehr Behaglichkeit: Räume können in kurzer Zeit temperiert werden, und die Wärmezufuhr ist präziser. Voraussichtlich Anfang 2009 will der Dortmunder Hersteller Wilo die Pumpen auf den Markt bringen.

Das Förderkonzept „Energieoptimiertes Bauen (EnOB)“ unterteilt sich in die beiden Bereiche „EnOB-FuE“ und „EnOB-Demo“, wobei die Demonstration und messtechnische Evaluierung innovativer Konzepte weiterhin nach Neubau (EnBau) und Bestand (EnSan) differenziert wird. Der Bereich „EnOB-FuE“ ist in thematische Verbünde modular gegliedert (Niedrig-Exergie-Technologien: LowEx, Vakuumisolation im Bauwesen: ViBau), die sukzessive um weitere Module erweitert werden, z.B. auf dem Gebiet der Gebäudebetriebsoptimierung (EnBop). In „EnOB: MONITOR“ werden umfangreiche Arbeiten zur Begleitforschung gefördert. In der Vergangenheit



Das Darmstädter Solarhaus, Gewinner des Solar Decathlon 2007 des US-Energieministeriums, entworfen und erbaut von Studenten der TU Darmstadt, ist ein Projekt, das vom BMWi im Rahmen von EnOB gefördert wird.

waren die vom BMWi in EnOB geförderten Projekte sehr erfolgreich. Viele der in den Projekten entwickelten und demonstrierten Technologien, Materialien und Systeme sind inzwischen kommerziell am Markt verfügbar. Damit wurden die Voraussetzungen für eine Verschärfung des ordnungsrechtlichen Regelwerks geschaffen.

Über die Vielzahl abgeschlossener und aktueller Projekte in EnOB informiert die Internetseite [www.enob.info](http://www.enob.info) sehr zeitnah. Einige Beispiele sind im Folgenden dargestellt.

### Das Haus ohne Heizung

Wer heute saniert oder neu baut, schafft für Jahrzehnte Fakten. „Daher ist es notwendig, dass die Kosten des gesamten Lebenszyklus von Gebäuden in den Mittelpunkt wirtschaftlicher Betrachtungen treten“, fordert Professor Karsten Voss von der Universität Wuppertal. Dies ist umso bedeutender, da bei großen Immobilien die Betriebskosten die Baukosten erfahrungsgemäß schon nach sieben bis acht Jahren übersteigen.

Ungedämmte Altbauten verbrauchen teilweise mehr als 200 Kilowattstunden pro Quadratmeter und Jahr (kWh/m<sup>2</sup>a) an Wärme und Strom. Zahlreiche Pilotprojekte, die das BMWi in den vergangenen Jah-

ren gefördert hat, belegen, dass eine Gebäudesanierung, die den Verbrauch um die Hälfte senkt, heute wirtschaftlich ist. Machbar ist weit mehr: So genannte 3-Liter-Haus-Sanierungen sind Stand der Technik. 3-Liter-Häuser verbrauchen im Jahr nur noch rund 30 kWh/m<sup>2</sup> an Heizenergie – umgerechnet in Heizöl entspricht das rund drei Litern – und damit etwa 80 Prozent weniger als unsanierte Altbauten. Noch sind Sanierungen auf diesen Standard relativ teuer. Experten gehen allerdings davon aus, dass sich der Standard über kurz oder lang durchsetzen wird. Denn die Zeiten sind vorbei, in denen die Heiz- und Betriebskosten eines Gebäudes finanziell gesehen nur ein „Neben“-Aspekt waren. Mit steigenden Preisen für Öl und Gas werden auch die Nebenkosten wachsen. Niedrige Energiekosten werden daher künftig den Wert einer Immobilie steigern.

Mit dem 3-Liter-Haus sind die technischen Möglichkeiten aber noch nicht ausgereizt. Passivhäuser reduzieren den Heizenergieverbrauch nochmals deutlich und kommen bei Einsatz einer effizienten Lüftungsanlage weitgehend ohne separates Heiz- bzw. Klimatisierungssystem aus. Die notwendige Wärme wird in Passivhäusern auf andere Weise gewonnen: Eine optimale Gebäudedämmung bewahrt etwa die Wärme der Sonneneinstrahlung, die von Elektrogeräten oder die zurückgewonnene Wärme aus der Abluft

#### Darmstädter Solarhaus gewinnt US-Wettbewerb

Studenten der TU Darmstadt haben den Beweis erbracht, dass die Sonne alle notwendige Energie für den täglichen Bedarf eines Gebäudes liefern kann. Sie entwarfen und bauten ein Haus mit 74 Quadratmetern Grundfläche, das allein über Solar- und Umweltenergie versorgt wird. Damit gewannen die Darmstädter Ende Oktober 2007 den Solar Decathlon des US-Energieministeriums – ein internationaler Wettbewerb, der Vorzeigebispiele für energiesparendes Wohnen liefern und das Thema einer breiten Öffentlichkeit zugänglich machen will. Das Gebäude der deutschen Gewinner ist aus drei Hüllen aufgebaut. Die äußerste bilden bewegliche Eichenholzlamellen, die mit Solarzellen bestückt sind. Die Module erzeugen Strom und schützen vor Überhitzung, Einblick und Einbruch. Die zweite Hülle besteht aus Sonnenschutzglas und Vakuumisolationspaneelen. Die Wände speichern Wärme durch mikroverkapseltes Paraffin, die Decke ist als Kühldecke ausgeführt und hat das Beleuchtungssystem integriert. Die dritte Hülle umfasst den Kern des Hauses mit Bad, Küche und Haustechnik. Innerhalb eines Forschungsvorhabens erfolgte die für ein solch ambitioniertes Gebäude notwendige Simulation, und so wird nun das Konzept am Standort Darmstadt „auf Herz und Nieren“ geprüft.





Das Science Center Overbach bei Jülich wird als „EnEff:Schule“ innerhalb von EnOB gefördert und im Jahr 2008 errichtet. Die Schule strebt energetisch die „2 Liter Schule“ an und will dies u. a. durch geschicktes Lastmanagement erreichen: „Die Schüler bringen die Wärme mit.“

so effektiv, dass auch ohne Heizung behagliches Wohnen möglich wird. 2006 gab es in Deutschland nach Angaben des Darmstädter Passivhaus-Instituts über 900 Gebäude mit Passivhaus-Standard, knapp 60 Prozent davon als freistehende Einfamilienhäuser. Die Auswertung von einzelnen Häusern, aber auch ganzen Siedlungen belegt, dass komfortables Wohnen rund ums Jahr mit einem Gesamtenergieverbrauch (also der gesamten Primärenergie inklusive Strom für Haushaltsgeräte und Beleuchtung) von unter  $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  möglich ist. Dieser Wert ist eines der drei Kriterien für Passivhäuser.

Auch Nullenergie- oder gar Plusenergiehäuser sind keine Vision mehr. Solche Gebäude brauchen in der jährlichen Bilanz rein rechnerisch keine externe Energie, weil sie Strom und Wärme komplett selbst erzeugen, in der Regel durch Solaranlagen und Kraft-Wärme-Kopplung. Im Rahmen von EnOB wird derzeit an einer technischen Definition des Nullenergiehauses gearbeitet, außerdem sollen Baukonzepte erarbeitet und bewertet werden.

### Mit Sonne bauen

Bereits mit heute verfügbaren Technologien sind energieoptimierte Gebäude realisierbar. Dies liegt in Deutschland zu einem großen Teil an der Kontinuität der Förderpolitik im Rahmen der rationellen Energieverwendung, denn viele dieser innovativen Techniken gelangten erst mit Hilfe von in EnOB

geförderten FuE-Projekten zum entscheidenden Durchbruch. Das gilt beispielsweise für thermische Solaranlagen, die insbesondere bei großen Gebäuden mit einem hohen und möglichst gleichmäßigen Warmwasserbedarf zuverlässig umweltverträgliche Wärme liefern. Die technischen Möglichkeiten sind heute so weit ausgereift, dass zumindest die Brauchwasservorwärmung mit Solarenergie zum festen Bestandteil einer Sanierung gehören kann.

Der Einsatz von Solarthermie sollte stets in einem umfassenden Sanierungskonzept geprüft werden, bei dem zunächst der Energiebedarf des Gebäudes so weit wie möglich minimiert und das konventionelle Heizsystem erneuert wird. Unter diesen Voraussetzungen kann die Solarthermie passiv und aktiv den Heizenergieverbrauch um bis zur Hälfte reduzieren. Die spezifischen Investitionskosten der Anlagen sinken mit der Systemgröße. Kollektorflächen von mehr als 100 Quadratmetern können Wohnsiedlungen, Hotels, Seniorenheime oder Krankenhäuser mit Wärme zu Kosten von 10 bis 13 Cent pro Kilowattstunde versorgen – vorausgesetzt, die Anlagen sind richtig dimensioniert, optimal ausgelastet sowie einfach aufgebaut. Die Kopplung von konventioneller Heizwärme und Solarthermie ist insbesondere außerhalb der Heizperiode – wenn der Wärmebedarf gering ist – wirkungsvoll: Im Sommer kann Solarthermie die Brauchwassererwärmung komplett übernehmen.

Sonne erzeugt mit herkömmlichen Kollektoren Wärme auf niedrigem Temperaturniveau. Dieses



Hochgedämmte Vakuumisolationspaneele (VIP) sind wegen der extrem geringen Wärmeleitfähigkeit nur wenige Zentimeter dick. Zu sehen ist das Innere der VIP mit weißem Polyurethan-Randstreifen; eine Abdeckung aus Edelhölzern, OSB (Grobspanplatten), Glas, Aluminium oder Edelstahl bildet die optisch fertige Oberfläche.

Niveau aber ist ausreichend, um Gebäude zentral zu kühlen und zu entfeuchten – vor allem dann, wenn sie rund ums Jahr gekühlt werden müssen, wie beispielsweise Labore und Gebäude mit hohen thermischen Lasten. Im Rahmen von Pilotvorhaben und Demonstrationsprojekten wurden sowohl geschlossene Kühlsysteme wie Ad- und Absorptionskältemaschinen als auch offene Kühl- und Entfeuchtungsverfahren getestet. Das Presse- und Informationsamt der Bundesregierung in Berlin beispielsweise wird solar über Absorptionskälteanlagen gekühlt. Die Anlagen werden im Sommer ausschließlich durch die Heizwärme eines Kollektorfeldes angetrieben. Überschüssige Kälte nutzt der EDV-Bereich des Presseamtes, der ganzjährig gekühlt werden muss.

### Wenn VIP dämmen

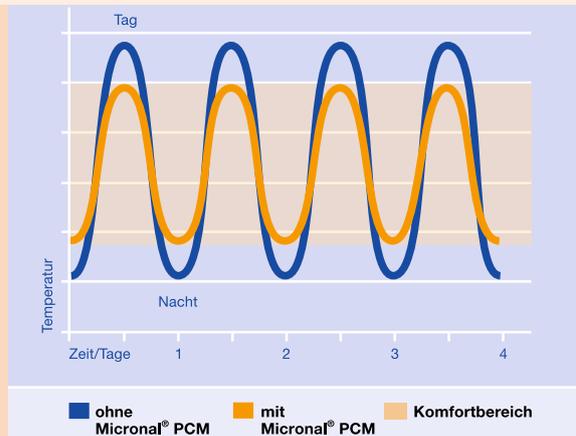
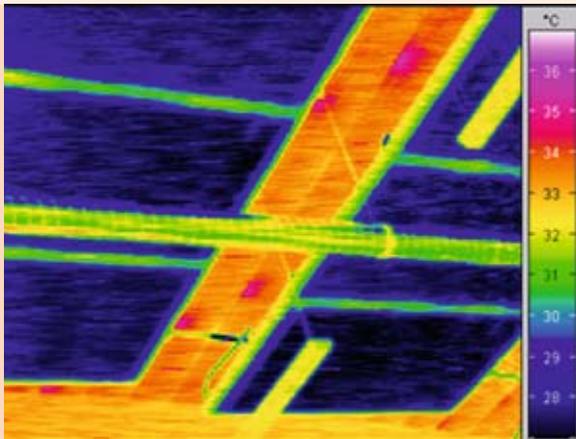
Energieeffiziente Gebäude brauchen eine optimale Dämmung. Bei Passivhäusern sind Dämmstärken von 30 Zentimetern und damit Wanddicken von bis zu 60 Zentimetern keine Seltenheit. Allerdings werden bei Sanierungen die Außenmaße oft durch Nachbarhäuser oder Baulinien begrenzt. Auch beim Neubau geht eine dicke Dämmung auf Kosten der nutzbaren Innenfläche. Eine Alternative sind so genannte Vakuumisolationspaneele (VIP) mit einer fünf- bis zehnmals geringeren Wärmeleitfähigkeit als herkömmliche Schäume oder Faserdämmstoffe. VIP bestehen aus einem porösen Füllkern, der in einer

Vakuummkammer in diffusionsdichte Kunststofffolien eingeschweißt wird. Nicht zuletzt dank des Beitrags der langjährigen Förderung von Forschung und Entwicklung der VIP-Technologie durch das BMWi ist diese heute technisch ausgereift und auf dem Markt verfügbar.

Dass Vakuumdämmung die Energieeffizienz von Wohnhäusern deutlich steigert, hat das BMWi an komplett vakuumgedämmten Neubauten gezeigt. In Neumarkt in der Oberpfalz und in Ravensburg wurden Demo-Gebäude komplett aus Holz- und Betonfertigteilen errichtet, die wenige Zentimeter dünne VIP integriert haben. Die Messungen zeigen: Obwohl die Wände statt 60 nur 27 bis 32 Zentimeter dick sind, ist der Heizenergieverbrauch mit Passivhäusern vergleichbar. Eine herstellerübergreifende Gütegemeinschaft will in Zusammenarbeit mit Prüfinstituten Qualitätskriterien, Verarbeitungsrichtlinien und Prüfvorschriften für VIP definieren und kontrollieren. Damit ist der Übergang aus dem FuE-Stadium in die Markteinführung vollzogen.

### Wärme und Kälte aus der Decke

Heizen und Kühlen von Gebäuden verursachen heute schon rund 40 Prozent des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland. Künftig wird es noch mehr sein: Da heißere Sommer in Mitteleuropa zu erwarten



PCM (Phasenwechselmaterialien) können als Kälte- und Wärmespeicher eingesetzt werden. Das Bild links demonstriert die kühlende Wirkung von PCM-Deckenelementen (blaue Zonen). Rechts der Vergleich des Temperaturverlaufes in einem Wohn- oder Bürobereich mit (orange Kurve) oder ohne (blau Kurve) Einsatz von PCM-Bauteilen.

sind und die inneren Wärmelasten (Computer/Haushaltsgeräte) zunehmen, müssen immer mehr Gebäude gekühlt werden, um die Komfortansprüche der Nutzer zu erfüllen. Zu konventionellen Klimaanlage gibt es heute umweltverträgliche Alternativen: so genannte thermoaktive Bauteilsysteme (TABS). Die Idee dahinter ist einfach: Gebäude lassen sich heizen und kühlen, wenn man Decken, Wände oder Fußböden in großflächige Heizkörper bzw. Kühlflächen verwandelt. Üblicherweise werden dafür Rohrregister oder dünne Kunststoffschläuche in die Betonteile eingegossen. Sie werden von Wasser durchströmt und wirken – je nach Raumtemperatur – als Heizung oder Kühlung. Experten schätzen, dass heute bereits jedes dritte neue Bürogebäude in Deutschland mit diesen Bauteilen errichtet wird.

TABS sind energieeffizient: Durch die große Austauschfläche für den Wärmeübergang genügen bereits geringe Temperaturunterschiede von wenigen Grad Celsius, um Räume zu heizen oder zu kühlen. Die Bauteile nutzen natürliche Wärmesenken wie Erdreich, Grundwasser oder Nachtluft zum Temperaturengleich. Eine Auswertung von drei Neubauten aus dem EnOB-Programm, in denen der Einsatz von TABS getestet wurde, zeigt: Der Primärenergieverbrauch liegt um den Faktor zwei bis drei unter dem von Standard-Büroneubauten. Allerdings sind TABS träge, da der Wärmeübergang über Strahlung und Konvektion Zeit braucht. Lastspitzen müssen daher von vornherein minimiert oder verhindert werden,

beispielsweise indem die Gebäudehülle optimal gedämmt wird und alle Fenster einen wirksamen Sonnenschutz erhalten.

Gut gelungen ist das beim „Energion“ in Ulm, einem EnOB Demo-Projekt (s. Abbildungen S. 12), dem weltweit größten Bürogebäude nach Passivhausstandard. Die Betonkerntemperierung sorgt zusammen mit einer umfassenden Wärmedämmung, mechanischer Be- und Entlüftung sowie beweglichem Sonnenschutz für komfortable Arbeitsbedingungen rund ums Jahr. Insgesamt 40 Erdsonden fördern kühles Grundwasser aus 100 Metern Tiefe, das durch die Rohrregister in den Betondecken strömt. Auch der Bonner Post-Tower, der ebenfalls mit Grundwasser gekühlt und geheizt wird, ist ein erfolgreiches Beispiel dafür, wie Ergebnisse der BMWi-Forschungsförderung jetzt im Markt umgesetzt werden. Selbst bei 39 Grad Celsius Außentemperatur wird es auch in den nach Süden orientierten Büros nicht wärmer als 26 Grad Celsius.

Energie effizient nutzen heißt auch, Wärme und Kälte effizient zu speichern und erst bei Bedarf zur Verfügung zu stellen. So genannte Latentwärmespeicher nutzen dafür den Phasenübergang bestimmter Materialien. Phasenwechselmaterialien (PCM) funktionieren nach einem einfachen physikalischen Prinzip: Wenn feste Substanzen – beispielsweise Paraffine – schmelzen, nehmen sie aus ihrer Umgebung Wärme auf. Sinkt die Umgebungstemperatur, erstarren sie und geben die Wärme wieder ab. PCM wirken daher

wie große Wärmespeicher, die beispielsweise Kühl-lasten vom Tag in die Nacht verschieben. In den ver-gangenen Jahren hat die PCM-Technologie, nicht zuletzt wegen der stetigen Forschungsförderung, große Fortschritte gemacht. Es gibt mittlerweile Deckenplatten, Leichtbauwände und Fassadenele-mente mit eingearbeiteten PCM, aber auch separate Kälte- und Wärmespeicher, die sowohl für Neubau als auch für Sanierungen geeignet sind.

Für die Planung und den Einsatz von Phasen-wechselmaterialien wurde das Planungs- und Simula-tionsprogramm „PCM express“ entwickelt. Es soll Architekten und Planer auf einfache Art und Weise unterstützen, indem es eine gesicherte Entschei-dungsfindung für die Dimensionierung von PCM etwa bei den Wandaufbauten oder bei Verände-rungen an der zugehörigen Haustechnik ermöglicht. Insbesondere unterstützt das Tool den Low-Exergie-Ansatz in Form von aktivierten Bauteilen und ener-giesparenden Kühltechniken. Zur Kosten-/Nutzen-analyse wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung basierend auf den Vorgaben der Richtlinie VDI 2067 in das Programm integriert.

TABS und PCM sind so genannte Niedrigexergie-Systeme, weil sie schon bei kleineren Temperaturdif-ferenzen zur Umgebung aktiv werden. Mit Exergie wird der Anteil der Gesamtenergie bezeichnet, der Arbeit verrichten kann. Exergie ist damit der wert-volle Teil der Energie. Mit dem EnOB-Forschungsfeld LowEX will das BMWi neue Heiz- und Kühlsysteme entwickeln und testen lassen, die mit kleinen Tempe-raturdifferenzen auskommen und damit das Potenzi-al der Energie besonders gut ausnutzen.

### Erleuchtung von draußen

Tageslicht ist wichtig für das Wohlbefinden von Men-schen – ob zuhause oder am Arbeitsplatz. Die EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz in Gebäuden gibt vor, dass für Nichtwohngebäude der Strombedarf für Beleuchtung künftig im Gebäudeenergieausweis ausgewiesen werden muss. Damit wird Tageslicht erstmals ein Faktor für Energieeffizienz.

Das Tageslichtangebot schwankt je nach Tages-zeit, Saison und Wetterlage. Eine effiziente Nutzung



Die Käthe-Kollwitz-Schule in Aachen – ein EnSan-Projekt – vor (im Bild oben) und nach der Sanierung: Das Gebäude aus den 50er Jahren, heute genutzt als Berufskolleg, verbraucht 65 Prozent weniger Energie für Heizung und Warmwasser sowie 15 Prozent weniger Strom als zuvor.

von natürlichem Licht muss daher den Lichteinfall im Winter maximieren und im Sommer beschränken. Die Industrie hat dafür in den vergangenen Jahren, zum Teil dank der Förderung durch das BMWi, eine breite Palette von Techniken entwickelt: Lamellen, die das einfallende Licht im Raum besser verteilen, optische Systeme, die Tageslicht in fensterlose Räume leiten, selbstleuchtendes Isolierglas, Hohllichtleiter für Produktionshallen und besondere Gläser: Sonnenschutzgläser verdunkeln sich bei starker Sonne auto-matisch. Bei schaltbaren Gläsern kann die Licht- und Strahlungsdurchlässigkeit nach Wunsch eingestellt werden. Noch sind die meisten dieser Technologien nicht weit verbreitet – das liegt zum einen an tech-nischen Hürden, zum anderen am relativ hohen Preis. Außerdem funktionieren die Systeme zur Zufrieden-heit der Nutzer nur dann, wenn zuvor lichttechnische und energetische Kennwerte des Gebäudes exakt erfasst wurden und die Beleuchtung daran individu-ell angepasst wird. Hier setzen die aktuellen For-schungs- und Entwicklungsarbeiten an: In dem vom BMWi geförderten Verbundvorhaben „Tageslicht und effiziente Beleuchtung“, das die TU Berlin koordi-niert, werden u. a. innovative Tageslichtsysteme für zukünftige Gebäude und die medizinische Wirkung effizienter Beleuchtung auf den Menschen unter-sucht.



Studentenwohnheim „Neue Bourse“ in Wuppertal nach der durch das BMWi-Programm EnSan geförderten Sanierung der Häuser.

### Energieeffizienz im Altbau

Deutschland ist reich an kommunalen Gebäuden. Doch viele der Schulen, Studentenwohnheime oder Kindertagesstätten sind sanierungsbedürftig, eine Wärmedämmung fehlt, Fenster und Heizungsanlagen sind veraltet. Beispielhafte Sanierungen belegen, dass öffentliche Gebäude ohne besonders aufwändige oder kostspielige Technik ihren Energieverbrauch um mehr als die Hälfte senken können. Dass energetische Sanierungen dabei meist zu win-win-Situationen führen, haben verschiedene vom BMWi geförderte Demonstrationsvorhaben gezeigt: Die Gebäude werden in Stand gesetzt, Verbrauch und Emissionen gesenkt, und gleichzeitig steigt der Komfort für die Nutzer.

► Da kaum noch neue Schulen gebaut werden, ist der Sanierungsbedarf bei bestehenden Schulgebäuden in den nächsten Jahren enorm hoch. Ein Vorbild ist das **Aachener Berufskolleg** (Käthe-Kollwitz-Schule) aus den 50er Jahren. Zwischen 2001 und 2003 wurden Fassade, Dach und Keller gedämmt, wurde Wärmeschutzverglasung eingebaut, das gesamte Gebäude an Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung angeschlossen, eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und eine tageslichtabhängige Beleuchtung installiert. Ergebnis: Der Energieverbrauch für Heizung und Warmwasser sank um 65 Prozent, der Stromverbrauch um rund 15 Prozent. Energieeffiziente Schulen – das ist auch künftig ein wichtiges Thema, und das BMWi leistet hier inner-

halb von EnOB mit dem Schwerpunkt „EnEff:Schule“ einen maßgeblichen Beitrag. In Pilotvorhaben sollen hier Plus-Energie-Schulen als Leuchtturmprojekte umgesetzt werden.

► Nur wenige Studenten ziehen freiwillig in ein altes Wohnheim aus den 70er Jahren ein. In Wuppertal ist das anders – hier gibt es lange Wartelisten für einen Wohnheimplatz. Allerdings erst seit 2003, seit die „Neue Bourse“ im Rahmen von EnSan aufwändig saniert wurde. Das ursprüngliche **Studentenwohnheim** bestand aus zwei Häusern, in denen undichte Fugen und unzureichende Dämmung zur Durchfeuchtung ganzer Bauteile geführt hatten. Im Zuge der Sanierung wurden die großen Wohngruppen durch Einzelappartements ersetzt. Das Gebäude wurde komplett mit vorgefertigten Fassadenelementen gedämmt, große dreifachverglaste Passivhausfenster bringen seither Licht und Sonnenwärme in die Zimmer. Die Wärmeversorgung erfolgt über Fernwärme aus Kraft-Wärme-Kopplung. Messungen zeigen, dass der Primärenergieverbrauch gegenüber dem Altbau um rund 60 Prozent gesunken ist. In einem der beiden Häuser gelang es, durch Einsatz von Passivhauskomponenten den Heizwärmeverbrauch auf 30 kWh/m<sup>2</sup>a zu senken.

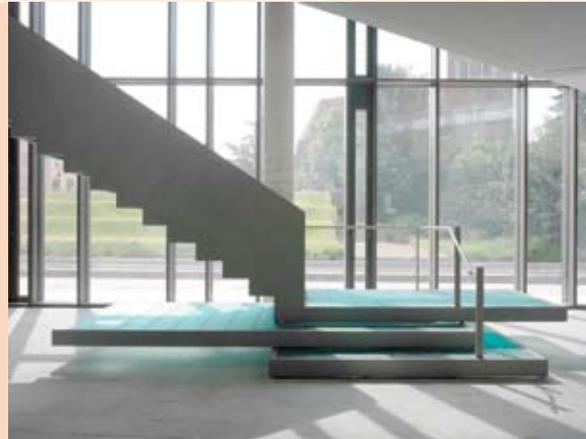
► Dass ein enormer energetischer Effizienzgewinn bei hoher architektonischer Qualität erreichbar ist, zeigte auch die Sanierung der **Kindertagesstätte Plappersnut** in Wismar 2004. Der Energieverbrauch ist seitdem um mehr als zwei Drittel niedriger: durch eine optimale Dämmung, Solarkollektoren für die Warmwasserversorgung, eine bedarfsgerechte Beleuchtung sowie Doppelfenster mit zwei Schichten Isolierverglasung. Eine Besonderheit ist die Vakuumdämmung: Vakuumisulationspaneele an vier Außenwänden mindern die Wärmeverluste des Gebäudes um 75 bis 90 Prozent. Keine Dämmung brauchten die Fassaden hin zum Atrium: Dieser unbeheizte Raum zwischen beiden Gebäuderiegeln wirkt als Zwischenklimazone. Die hier vorgewärmte Luft dringt in die Gebäude und senkt den Heizbedarf. Das Konzept ist Vorbild für mehr als 300 typengleiche Gebäude allein in Mecklenburg-Vorpommern. Und es unterstützt wohl auch ein die Gesundheit förderndes Sanierungskonzept, denn die Wismarer Kindertagesstätte berichtet, dass der Krankenstand merklich gesunken ist.

► Oft stoßen Altbaumodernisierungen an technische oder wirtschaftliche Grenzen. Hier ist Kreativität gefragt, um eine hochwertige Sanierung kostengünstig umzusetzen. Dass es praktikable Lösungen gibt, zeigt das Beispiel der denkmalgeschützten **Thiepval-Kaserne** in Tübingen, die zu einem energieeffizienten Bürogebäude umgebaut wurde. Der Ausbau des Dachgeschosses war nur in Leichtbauweise möglich. Die Decken wurden mit besonderen Gipsplatten verkleidet: Die dünnen Platten enthalten mikroverkapselte Paraffine, die als Latentwärmespeicher im Sommer ähnlich gut Wärme puffern wie fünf Zentimeter dicker Beton. Das Beispiel zeigt: Sanierungen auf Passivhausniveau sind wirtschaftlich. Die Mehrkosten liegen gegenüber einer Sanierung nach den Vorgaben der Energieeinsparverordnung bei ca. 150 Euro pro Quadratmeter – Investitionen, die sich im Laufe weniger Jahre durch deutlich geringere Energiekosten amortisieren werden. Der Heizwärmebedarf der Thiepval-Kaserne liegt heute bei rund 23 kWh/m<sup>2</sup>a, die Zusatzkosten für die Passivhauskomponenten lagen bei 81 Euro pro Quadratmeter.

### Energieeffizienz im Neubau

► Selbst wenn im Gebäudebestand das größte Potenzial zur mittelfristigen Effizienzsteigerung liegt, ist die Anwendbarkeit innovativer Technologien nicht auf den Altbau beschränkt. Der Motor für technologische Neuentwicklungen liegt sogar in der Regel im Neubaubereich, denn hier kann nahezu kompromisslos an integrierten Gebäudekonzepten gearbeitet werden. Solche integrierten Konzepte sind für die längerfristige Perspektive essentiell. Darüber hinaus sind die wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse aus den in EnBau durchgeführten Pilot- und Demonstrationsvorhaben inzwischen abgesichert und bilden eine wertvolle Grundlage für die ordnungsrechtlichen Maßnahmen zur Energieeffizienz (Energieeinsparverordnung – EnEV). Das BMWi setzt im Rahmen von EnOB mit EnBau einen Schwerpunkt bei der rationalen Energienutzung in Neubauten; einige der in jüngster Zeit geförderten Projekte demonstrieren den Erfolg dieser Fördermaßnahme:

► Ehrgeiz und Fleiß sind im Stundenplan jeder Schule fest verankert. Ehrgeizig war auch das Gebäudekonzept, das der Landkreis Biberach für eine neue



Holz und Glas prägen das Erscheinungsbild des neuen Dienstleistungszentrums in Eberswalde.

**Berufsschule** entwickeln ließ. Die Gerhard-Müller-Schule – ein EnBau-Vorhaben – sollte nicht mehr als 30 kWh/m<sup>2</sup>a Energie für Heizung und Warmwasser verbrauchen und damit den 3-Liter-Haus-Standard erfüllen. Das 2004 erbaute Gebäude nutzt in erster Linie thermoaktive Decken und Fußböden (TABS) zur Heizung und Kühlung. Treppenhäuser, Fenster und Atrien erhielten einen umfassenden Sonnenschutz. Schon 2005 war der Jahresprimärenergiebedarf für Wärme- und Kälteversorgung, Lüftung sowie Hilfsenergie rund 70 Prozent niedriger als der eines herkömmlichen Schulgebäudes. Nicht nur die Ingenieure sind zufrieden. Eine Umfrage unter den Schülern ergab, dass sie sich mit ihrer neuen Schule identifizieren – nicht zuletzt dank des guten Raumklimas. Graffiti und demolierte Einrichtung sind seither passé.

► Auch in Eberswalde steht seit Kurzem ein Vorzeigebispiel in Sachen Energieeffizienz, Komfort und Wirtschaftlichkeit. Seit Juli 2007 arbeitet die Kreisverwaltung im neuen **Dienstleistungszentrum**. Die Fassaden der vier kompakten Blöcke haben Vakuumdämmung und Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen. Die Bohrpfähle unter den Gebäuden sind mit Absorberregistern belegt, die dem Erdreich Heizwärme entziehen, im Sommer dagegen überschüssige Wärme wieder abgeben. Die Förderung durch das EnOB-Programm ermöglichte eine umfassende Fachplanung und den Einsatz moderner Simulationsprogramme und innovativer Komponenten. Insgesamt liegt der Energiebedarf für Heizung und Warmwasser des 15.000 Quadratme-



Gut gedämmte Fassaden und Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen sorgen im neuen Dienstleistungszentrum in Eberswalde für einen niedrigen Energieverbrauch. Ein ausgeklügeltes Tages- und Kunstlichtkonzept ermöglicht eine energieeffiziente Beleuchtung.

ter großen Komplexes unter  $30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Und das zu wirtschaftlichen Kosten: Die Verpflichtung, die Bauleistungen öffentlich auszuschreiben, und die Teilung der Arbeiten in kleinere Lose ermöglichte die Vergabe an qualifizierte und gleichzeitig kostengünstige Baufirmen. In der Folge lagen die Baukosten unter 1300 Euro pro Quadratmeter Nutzfläche.

- ▶ Bürogebäude brauchen weit weniger Heizwärme als Wohnbauten, denn hohe Nutzerdichte und elektronische Geräte sind erhebliche Wärmelasten. Beim Neubau des **Zentrums für Umweltbewusstes Bauen** in Kassel wurden diese Aspekte optimal umgesetzt. Eine großflächige Wärmeschutzverglasung in Verbindung mit effektivem Sonnenschutz maximiert im Winter die solaren Gewinne und vermeidet im Sommer eine Überhitzung. Die Bodenplatte ist auf ihrer Oberseite wärmegeämmt und mit Rohrregistern durchzogen, so dass der Boden wie ein Wärmetauscher im Sommer überflüssige Wärme an das Erdreich abgibt. Der Endenergiezielwert von  $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  für Heizen und Hilfsenergien für technische Gebäudeausrüstung konnte mit  $32 \text{ kWh/m}^2$  im Jahre 2003 weit unterschritten werden.

- ▶ Energieeffizientes Bauen ermöglicht individuelle Konzepte, die auf spezielle Bedürfnisse der Nutzer abgestimmt sind. Das zeigt das EnBau-Vorhaben der **Behinderten-Werkstätten** in Lindenberg im Allgäu. Die Werkstätten bieten mit großen Fensterflächen, viel Holz und ansprechenden Farben eine anregende Umgebung. Für behagliche Wärme sorgen Wärme-

pumpe, Pelletkessel und thermisch aktive Decken und Fußböden. Eine überglaste Werkstraße verbindet die Werkstätten mit dem Gemeinschaftshaus und versorgt sie optimal mit Tageslicht. Bereits während der Planung wurden die Werkstätten mit Hilfe eines integralen Software-Programms über ihren gesamten Lebenszyklus ökologisch und ökonomisch bilanziert. Ergebnis: Der niedrige Energiebedarf und die Nutzung regenerativer Energien schaffen eine erhebliche Umweltentlastung. Vor allem aber nehmen die rund 140 Behinderten, von denen die meisten ihr ganzes Berufsleben hier verbringen, das Haus gut an und fühlen sich wohl – nicht zuletzt dank der barrierefreien und einfachen Orientierung, der hellen Räume und behaglichen Atmosphäre.

### Künftige FuE-Themen

Im Bereich der Forschung und Entwicklung von Gebäudekomponenten, wie z.B. Wärmeschutz, sind in den vergangenen 15 Jahren bedeutende Fortschritte erzielt worden. Sie ermöglichen es, dass der 3-Liter-Haus-Standard in Sanierung und Neubau wirtschaftlich ist. Die langfristige Zielvorgabe in EnOB heißt „Nullenergiegebäude“. Dies bedeutet, dass besonders in der Bautechnik und der Technischen Gebäudeausrüstung integrierende FuE-Anstrengungen weitergeführt werden müssen, denn nur dann kann es unter hiesigen Witterungsbedingungen gelingen, die Jahres-Nullenergiebilanz bei Gebäuden wirtschaftlich zu erreichen.

## Energieeffiziente Stadt

Städte und Kommunen sind wichtige Akteure für mehr Energieeffizienz: Sie bestimmen über Bebauungspläne und Versorgungsstrukturen, sind Besitzer zahlreicher Gebäude und Anteilseigner von Stadtwerken und Wohnungsbaugesellschaften. Sie entscheiden über den Ausbau von Fernwärme und darüber, welche Rolle Energieeffizienz bei der Sanierung öffentlicher Gebäude spielt. Obwohl sich in Deutschland mittlerweile viele Kommunen mit Klimaschutz und Energiesparen beschäftigen, sind die Fortschritte in der Praxis eher bescheiden. Das liegt weniger an mangelnder Technik oder zu geringer Wirtschaftlichkeit ambitionierter Projekte. Was oft schlicht fehlt, ist das konkrete Wissen über die vor Ort am besten geeigneten Maßnahmen. Außerdem planen kommunale Versorgungsunternehmen oft nur für wenige Jahre; Energieeffizienz erfordert dagegen langfristig angelegte Konzepte.

Das im Sommer 2007 vorgestellte neue Förderkonzept „Energieeffiziente Stadt“ (EnEff:Stadt) des BMWi will diese Hemmnisse abbauen helfen. Die Initiative greift eine Vielzahl vorhandener Instrumente auf: So sollen beispielsweise Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Fernwärme, innovative Dämmung und Abwärmennutzung, intelligente Regeltechnik und moderne Informationstechnik so vernetzt werden, dass energieoptimiertes Bauen und energetische Sanierung in kompletten Quartieren und Stadtvierteln verbessert wird.

Erfahrungen aus Bau und Sanierung von Einzelobjekten sind dafür eine wichtige Basis. Die Karlsruher Volkswohnung, eines der größten Wohnungsunternehmen Baden-Württembergs, hat durch Förderung des BMWi beispielsweise einen großen Komplex mit 375 Wohnungen aus den 70er Jahren saniert und modernisiert. „Der Heizenergieverbrauch wurde halbiert und die CO<sub>2</sub>-Emissionen um rund zwei Drittel gesenkt“, resümiert Dr. Reinhard Jank von der Karlsruher Volkswohnung. Außerdem zeigten Befragungen der Mieter, dass durch die Sanierung gleichzeitig der Wohnkomfort deutlich angestiegen ist.

Doch eine Übertragung solcher Sanierungsprogramme auf ganze Stadtviertel ist nicht einfach. Wohnhäuser, Schulen, Gewerbebetriebe und Bürogebäude unterscheiden sich in ihrem Heizbedarf und ihren Lastspitzen; Gewerbe und Kleinindustrie brau-



chen häufig eine höhere Energiegrundlast als Wohnhäuser. „Außerdem: Je größer die Anzahl der Beteiligten und je unterschiedlicher deren Bedürfnisse, desto komplexer werden die Projekte,“ sagt Jank. Eine energieeffiziente Stadt wird daher nur möglich, wenn alle Akteure an einem Strang ziehen. Auch der neue nationale Energieeffizienz-Aktionsplan der Bundesregierung betont: Die Steigerung der Energieeffizienz ist nicht allein eine Sache der Politik. Sie ist vielmehr eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe, die auf engagierte Beiträge von Bürgern, Wirtschaft, Ländern und Kommunen angewiesen ist ([www.eneff-stadt.info](http://www.eneff-stadt.info)).

### Effizienz im Netz

Fernwärme ist ein wichtiger Schlüssel zur energieeffizienten Stadt. Sie kann aus fossilen oder regenerativen Quellen, aus Abwärme oder über Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt werden. Fernwärme braucht allerdings ausgedehnte Leitungsnetze, die mit einem hohen Fixkostenanteil verbunden sind. In der Vergangenheit war das im Vergleich zu individuellen Heizlösungen ein klarer Nachteil. Künftig könnten sich die Vorzeichen umdrehen: Fernwärme ist gegenüber steigenden Öl-, Kohle- und Gaspreisen weniger anfällig als andere Systeme zur Wärmeversorgung. Das BMWi geht davon aus, dass der Fernwärmeanteil an der Wärmeversorgung – der derzeit in Deutschland bei rund zwölf Prozent liegt – erheblich gesteigert



Energiezentrale für die Kälteversorgung des Potsdamer Platzes in Berlin (Gebäudeansicht auf S. 22).

werden kann. Ein Vorbild liefert Skandinavien. Dort liegt der Anteil bei rund 50 Prozent.

Transport und Verteilung machen bis zu 70 Prozent der Fernwärmekosten beim Kunden aus. Für die Ausdehnung der Netze auch außerhalb von großen Ballungsräumen ist daher eine Minderung der mit den Netzen verbundenen Fixkosten notwendig. Das BMWi wird daher im Rahmen des Förderkonzepts „Energieeffiziente Fernwärme“ (EnEff:Wärme) Projekte unterstützen, die eine Fernwärme-Versorgung effizienter und zugleich wirtschaftlicher machen. Ansatzpunkte dafür gibt es reichlich: von der Optimierung der Wärme- und Kälteerzeugungstechniken über verbesserte Wärmetauschersysteme, Rohrleitungen und Verlegetechniken bis hin zur Konzeption neuartiger Netze.

Mehr Effizienz bringen beispielsweise niedrigere Vorlauftemperaturen. Neue oder sanierte Gebäude haben einen weit geringeren Wärmebedarf als Altbauten. Für diese Verbraucher sind Vorlauftemperaturen deutlich unter 70 Grad Celsius ausreichend – die meisten bestehenden Netze liefern dagegen Wärme mit 80 bis 130 Grad Celsius. Ein kühlerer Vorlauf erleichtert zudem die Nutzung von Abwärme oder regenerativen Energien. Im Rahmen von

„EnEff:Wärme“ sollen Demo-Vorhaben gefördert werden, die durch eine Kombination von umfassender Gebäudesanierung mit effizienten Wärmenetzen den Primärenergieverbrauch so weit senken, dass er dem von Niedrigenergiehäusern bzw. Passivhäusern nahe kommt.

Im ländlichen Raum ist die Anzahl der Nutzer von Fernwärme pro Fläche weit geringer als in der Stadt – ein Faktor, der zu höheren Investitionen pro angeschlossenen Gebäude führt. Daher müssen, um wirtschaftlich zu sein, besonders kostengünstige Versorgungssysteme geplant und umgesetzt werden. Eine Vorlauftemperatur von weniger als 70 Grad Celsius spart nicht nur Primärenergie, sondern ermöglicht vor allem auch den Einsatz von preiswerten, flexiblen Kunststoffleitungen und erhöht die Effizienz von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. In ländlichen Regionen bietet sich außerdem die Nutzung regionaler Rohstoffe wie Abfälle oder Biogas an. Ein Vergleich verschiedener Energieträger, den das Fraunhofer-Institut UMSICHT durchgeführt hat, zeigt: Für die Erzeugung der Grundlast sind insbesondere Blockheizkraftwerke, die mit Bio- oder Erdgas arbeiten, wirtschaftlich – das umso mehr, wenn das Biogas aus Gülle oder pflanzlichen Abfällen gewonnen wird.



Leitwarte der GuD-Anlage im Münchener Süden: Effizienzgewinn durch niedrigeres Temperaturniveau.

„Auf diese Weise kann Fernwärme schon zu Endkosten von deutlich unter zehn Cent pro Kilowattstunde erzeugt werden“, sagt UMSICHT-Experte Dr. Christian Dötsch.

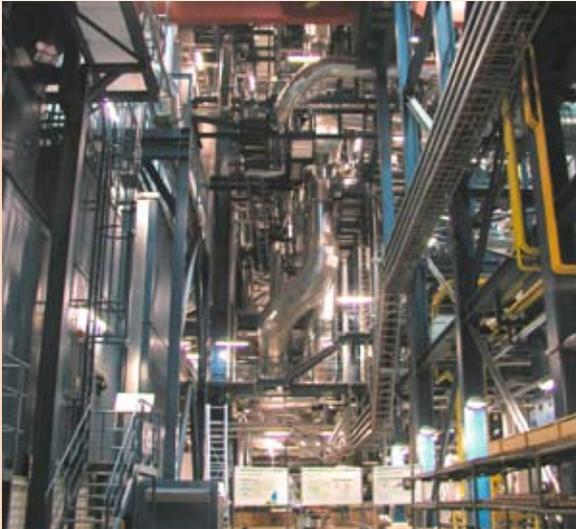
### Wärme mit Wasser statt Dampf

Auch Dampf ist als Wärmeträger in Fernwärmenetzen noch vorhanden. Doch er bringt eine Reihe von Nachteilen mit sich: Dampfnetze sind teuer in Wartung und Instandhaltung, aus den hohen Betriebstemperaturen resultieren große Wärmeverluste, das Verlegen der Leitungen ist aufwändig und der Neuanschluss für den Kunden damit relativ teuer. Außerdem verhindern die hohen Temperaturen eine effektive Kraft-Wärme-Kopplung und die Einkopplung von Niedertemperaturwärme aus Abwärme oder Biomasse.

In Deutschland gibt es rund einhundert Dampfnetze mit etwa 1300 Kilometern Trassenlänge. Eines der größten Netze mit 250 Kilometern Trassenlänge und 4400 Kunden hat die Stadt München. Die hohen

Dampftemperaturen mit zum Teil deutlich über 130 Grad Celsius waren allerdings schon in der Vergangenheit zumeist überflüssig: 95 Prozent aller angeschlossenen Verbraucher benötigen Heizwärme auf einem Temperaturniveau von unter 100 Grad Celsius.

Die Absenkung der Vorlauftemperaturen ist daher nicht nur sinnvoll, sondern auch marktgerecht. Ein BMWi-Forschungsvorhaben gemeinsam mit den Stadtwerken München belegt, dass der energetisch ungünstige Dampf durch Heißwasser ersetzt werden kann. Seit 2003 stellt die Stadt ihr Wärmenetz sukzessive um. Damit steigern die Stadtwerke die Effizienz ihrer KWK-Anlagen, denn der Dampf in den Turbinen kann effizienter als bisher verstromt werden. Das neue Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk (GuD) im Münchner Süden erzeugt rund 160 Gigawattstunden mehr Strom pro Jahr, seit die Turbinenabwärme in das neue Heißwassernetz ausgekoppelt wird. Das Projekt setzt außerdem Akzente für den lokalen Klimaschutz: Der reduzierte Energieeinsatz erspart Stromimporte aus dem deutschen Verbundnetz mit einem CO<sub>2</sub>-Potenzial von über 100.000 Tonnen im Jahr. Nicht zuletzt hat das Projekt Signal-



Gut 160 Gigawattstunden mehr Strom pro Jahr erzeugt die neue GuD-Anlage im Münchener Süden, indem sie die Turbinenabwärme nicht in ein Dampf-Fernwärmenetz, sondern in das neue Heißwassernetz auskoppelt (Bild links).

wirkung auf andere Städte: Auch Ulm, Kiel und Hamburg wollen ihre Wärmenetze auf Heißwasser umstellen.

Fernwärmenetze liefern zwar Energie für Heizung und Warmwasser, im Sommer aber nicht die notwendige Kälte. In Neubrandenburg ist das anders: Hier wird seit 2005 getestet, wie effektiv sich Überschusswärme aus einem GuD-Heizkraftwerk im Sommer in tief liegenden Grundwasserleitern speichern und im Winter wieder entnehmen lässt. Der Aquiferspeicher besteht aus zwei 1250 Meter tiefen Bohrungen, die mit einer Rohrleitung verbunden sind. Im Sommer wird aus der „kalten“ Bohrung Thermalsole entnommen und mit der Abwärme des Kraftwerks aufgeheizt. Die erhitzte Sole wird in die zweite Bohrung wieder injiziert. Tief im Boden erhöht sie die Temperatur des Thermalwassers auf bis zu 80 Grad Celsius. Im Winter wird Wasser aus der „warmen“ Bohrung gefördert und in Fernwärmenetze eingespeist. In den Wintern 2005 und 2006 arbeitete der Speicher ohne Probleme. Allerdings zeigen die Auswertungen, dass der Betrieb noch nicht effizient genug ist. Das liegt jedoch nicht am Speicher selbst, sondern daran, dass eine Vorhersage des tatsächlichen Wärmebedarfs der angeschlossenen Verbraucher ausgesprochen schwierig ist.

Fernwärmenetze lassen sich an die Bedürfnisse der Verbraucher anpassen und gleichzeitig wirtschaftlich, effizient und klimaschonend betreiben. „Für Heizen und Kühlen genügt im Prinzip Energie

mit sehr niedrigem Exergieanteil“, sagt Dr. Christian Dötsch vom Fraunhofer-Institut UMSICHT. Auf Fernwärme gemünzt bedeutet das Prinzip der niedrigen Exergie (LowEx): Heizkraftwerke müssen die Primärenergie ohne große Verluste in möglichst viel Strom und den Rest in nutzbare Wärme umwandeln.

Wie neuartige Fern- und Nahwärmenetze aussehen könnten, will das Institut im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projekts in den kommenden Jahren untersuchen. Im Zentrum stehen mehrere Fragen: Wie können Neubaugebiete effizient mit Wärme, Kälte und unter Umständen auch mit Strom versorgt werden? Lassen sich energetisch sanierte Altbauten in bestehende Fernwärmesysteme integrieren? Welches Potenzial haben zusätzliche Sekundärnetze, die beispielsweise Heißwasser im Winter und Kühlwasser im Sommer liefern?

Viel versprechend sind beispielsweise doppelte Netze, die getrennte Leitungen für heißes Duschwasser und kühleres Heizungswasser haben. Einen Effizienzgewinn verspricht auch die Idee, die Restwärme des Rücklaufs noch für Gebäude zu verwenden, die einen geringen Heizbedarf haben. Hohe Effizienz steht dabei immer im Vordergrund, selbst wenn Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. „Auch Erneuerbare sind begrenzt“, betont Dötsch. Denn die Flächen für Windkraftanlagen, Biomasse oder Solarmodule sind nirgendwo unendlich.



Etwa ein Viertel des Energieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Industrie. Vielfach liegt der hohe Energiebedarf jedoch in der Natur der Sache, denn die Prozesse spielen sich häufig bei Temperaturen oberhalb von 1000 Grad Celsius ab. Ein Gespräch mit Dr.-Ing. Frank Grote, Geschäftsführer der Gustav Grimm Edelstahlwerke in Remscheid (rechts), und Dipl.-Ing. Wolfgang Bender, Leiter der Abteilung Gaswirtschaft und Industrieofentechnik im VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI), Düsseldorf.

## „Wir sparen mehr als 30 Prozent Erdgas ein“

? Welche Motive stehen bei der Entscheidung eines Unternehmens Pate, sich an einem Forschungsprojekt zur effizienteren Energienutzung zu beteiligen?

**Grote:** Die Stahlindustrie hat aufgrund recht hoher Energiepreise hierzulande ein großes Interesse daran, Energie einzusparen, und sie hat schon vielfältige Maßnahmen zu einer effizienteren Energienutzung ergriffen. Wir können wohl mit Fug und Recht davon ausgehen, dass Deutschland hier auch in einer weltweiten Perspektive Vorreiter ist. Aber die Motivation, dass wir uns an Projekten des BMWi zur Energieeffizienzforschung beteiligen, geht weit über solche Kostenerwägungen hinaus, denn es ist klar, dass wir den Ausstoß von CO<sub>2</sub> weiter verringern müssen, um das Klima zu schützen. Es geht um Zukunftsvorsorge, denn meist ist es ja so, dass sich etwa der kurzfristig zu erreichende wirtschaftliche Nutzen einer Neuentwicklung zunächst in Grenzen hält. Dagegen stehen zum Beispiel Störungen im Betriebsablauf durch Tests bis hin zu Produktionsausfällen.

**Bender:** Unser Institut arbeitet eng mit den Unternehmen der Stahlindustrie, aber auch anderer Industriezweige zusammen. Dabei haben wir immer wieder feststellen können, dass die Bereitschaft in den Unternehmen, über Unternehmensgrenzen hinweg zu kommunizieren und Neuentwicklungen gemeinsam anzupacken, generell zunimmt und in Teilbranchen wie beispielsweise der Schmiedetechnik wirklich sehr groß ist – übrigens auch über Wettbewerbsgrenzen hinweg. Wir erleben dies gerade wieder einmal in unserem Projekt KINAMI. Hier entwickeln wir zusammen mit größeren und kleineren Unternehmen der Schmiedetechnik ein innovatives thermisches Regenerator-Flachflammenbrenner-System, um sowohl CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch Betriebskosten von Hochtemperaturöfen zu senken. Sie werden zur Wiedererwärmung von Brammen und Blöcken aus dem Stahlwerk gebraucht, denn damit Stahl geschmiedet werden kann, muss der Werkstoff zunächst wieder auf rund 1200 Grad Celsius aufgeheizt werden. Mit dem neuartigen Regenerator-Flachflammenbrenner, der die Abwärme aus dem Ofen absaugt und durch einen keramischen Speicher führt, um die Wärme zwischenzuspeichern, haben wir es im Technikum und im Betrieb

schon geschafft, damit im gegenläufigen Zyklus die Brennluft auf rund 1000 Grad zu erhitzen. Bislang sind hier 350 Grad Celsius Stand der Technik.

? Und wie groß ist der damit verbundene Energieeinspareffekt?

**Bender:** Etwa 30 bis 35 Prozent.

**Grote:** Das ist ein sehr positives Ergebnis. Wir sind überzeugt, dass sich dieses Forschungsengagement rechnen wird. Und darüber hinaus wissen wir, dass wir mit der Energieeinsparung auch die Emissionen von CO<sub>2</sub> reduzieren. Mit diesem Ergebnis sind wir sehr zufrieden.

? Wie gelang Ihnen diese innovative Lösung?

**Bender:** Die Initialzündung ging von einer Diskussionsrunde am Rande einer Tagung aus, und daran kann man ermessen, wie groß die Rolle der Kommunikation bei jeder Innovation ist. In unserem Institut hatten wir einen ähnlichen, einfacher gestalteten Regenerator zuvor schon zusammen mit einem Unternehmen der Aluminiumindustrie entwickelt. Das hierbei gesammelte Know-how konnten wir nun in dieses Projekt der Stahlindustrie einbringen.

**Grote:** Wir haben die Neuentwicklung unter realistischen Bedingungen im Produktionsumfeld getestet. Klar, dass dabei noch einige so genannte Kinderkrankheiten aufgetreten sind. Weitere Tests in anderen Unternehmen, mit etwas anders gelagerten Anforderungen stehen an, so dass schließlich unsere Branche über ein energiesparendes Regenerator-Brenner-System verfügen können. Übrigens: Die Neuentwicklung glänzt nicht nur unter den Gesichtspunkten Wirtschaftlichkeit und Klimaschutz – es hat sich herausgestellt, dass der neue Brenner die Wärme sehr viel gleichmäßiger im Ofen verteilt und an den Stahl abgibt.

**Bender:** Das bringt einen enormen Qualitätsschub mit sich, denn schon kleinste Temperaturschwankungen wirken sich auch bei diesen hohen Temperaturen negativ aus. Das ist ein Nebenergebnis in diesem Projekt, das wir sicherlich auch in anderen Bereichen nutzen wollen. Wenn man so will, liegt hier schon der Keim für ein neues Forschungsprojekt.

## Effiziente Energienutzung in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen



In der Glasindustrie beträgt die Schmelztemperatur je nach Glastype und Materialzusammensetzung zwischen 1000 und 1600 Grad Celsius. Neuartige Dämmstoffe können auch hier die Wärmeverluste der Öfen verringern.

Der Anfang ist gemacht: In den letzten 30 Jahren hat sich die Energie- und Rohstoffeffizienz in der Industrie deutlich erhöht. Produktionsanlagen wurden kontinuierlich erneuert und Prozesse optimiert. Viele Branchen waren einem Wandel unterzogen. Doch die ungenutzten Einsparungspotenziale sind nach wie vor hoch. Die Zahlen sprechen für sich: Mehr als 40 Prozent der in Deutschland benötigten Endenergie fallen in den Bereichen Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen an.

In gewerblichen Betrieben und Handelsunternehmen schlägt allein die Raumwärme mit rund 46 Prozent in der Energieabrechnung am stärksten zu Buche. In industriellen Betrieben ist es die Prozesswärme, die mit rund 65 Prozent den größten Anteil des Endenergieverbrauchs darstellt.

### Die doppelte Herausforderung: Energie sparen und Qualität verbessern

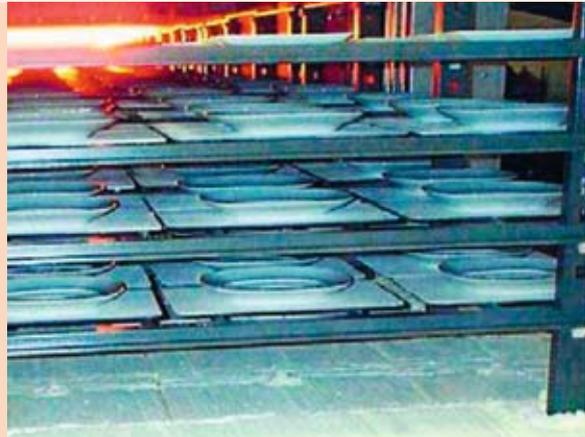
Wer sich dazu entschließt, Energie einzusparen, schont nicht nur die Umwelt, sondern senkt auch die Betriebskosten. Die Erfahrung zeigt jedoch: In der Industrie ist die Bereitschaft zur Anwendung energiesparender Maßnahmen nicht allein an eine Entlastung des Geldbeutels gekoppelt. Unternehmensführungen lassen sich häufig erst dann überzeugen, wenn sie sich von den Umstrukturierungen zusätzliche Vorteile erhoffen. Das kann eine Erhöhung der Produktqualität, eine Steigerung der Betriebssicherheit oder eine Optimierung der Fertigungsabläufe sein. Manchmal ist es auch einfach nur der Prestigegewinn, der den Ausschlag für eine technische Neuausrichtung gibt. Fest steht: Ohne Investitionen in

eine effiziente Energienutzung lassen sich in der heutigen Zeit keine zukunftsorientierten Unternehmensstrategien mehr entwickeln. Um in den Chefetagen Überzeugungsarbeit zu leisten, bedarf es erfolgreicher Praxisbeispiele und anwendungsorientierten Know-hows. Was sich bereits an anderer Stelle bewährt hat, wird im eigenen Betrieb schneller umgesetzt.

Der Blickwinkel der Ingenieure hat sich in vielen Fällen verändert. Denn der Energiebedarf vieler Einzelprozesse hat sich dem physikalischen Grenzwert durch technische Weiterentwicklungen mittlerweile so angenähert, dass der Spielraum für Verbesserungen begrenzt ist. Stattdessen ist der Blick aufs Ganze gefragt: Die Ingenieure suchen nicht nur nach neuartigen Materialien und innovativen Verfahren zur Energieeinsparung, sondern rücken verstärkt die kompletten Prozessketten in den Fokus der Forschung. Etablierte Abläufe müssen auf den Prüfstand gestellt, einzelne Verfahren besser miteinander verknüpft werden. Hier spielen zunehmend neuronale Netze eine wichtige Rolle. Sie helfen, Produktionsabläufe über modellhafte Berechnungen zu steuern und energieeffizienter zu gestalten.

Die Arbeiten in den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen zahlen sich aus. Das zeigen auch die Ergebnisse der Förderprojekte des BMWi. Viele der neu- oder weiterentwickelten Techniken sind inzwischen kommerziell verfügbar und haben den Weg in den Markt gefunden. Aufgrund ihres hohen Exportanteils tragen sie weltweit dazu bei, die Energieeffizienz und Umweltverträglichkeit industrieller Produktionsprozesse zu verbessern.

Die Verteilung der staatlichen Fördermittel orientiert sich an den Verbrauchsschwerpunkten. Aktuell an Bedeutung gewonnen haben unter anderem Förderprojekte zur besseren Ausnutzung von Prozesswärme. Dieser Begriff umfasst alle Formen von Wärme, die in industriellen oder gewerblichen Prozessen zum Einsatz kommen, sei es in Autowaschanlagen oder Zementöfen. Das Einsparpotenzial ist groß. Allein in den Hochtemperaturprozessen der keramischen Industrie gehen rund 40 Prozent der unter energetisch hohem Aufwand erzeugten Wärme als Abwärme verloren.



In der keramischen Industrie erreichen manche Öfen Temperaturen von über 1800 Grad Celsius.

### Schwerpunkte der Forschung

Was man hat, sollte man gut nutzen. Das gilt auch für den Umgang mit Massenwerkstoffen, die bei der Herstellung viel Energie verschlingen. Allein in Deutschland werden jährlich weit über 40 Millionen Tonnen Stahl, weit über 30 Millionen Tonnen Zement und rund 20 Millionen Tonnen Papier hergestellt. Um den Materialdurchsatz und den Energieverbrauch der Wirtschaft zu senken, müssen die Kreisläufe aus Produktion, Nutzung, Entsorgung und Wiederverwertung enger gefasst werden. Die effiziente Nutzung von Werkstoffen gehört daher ebenfalls zu den neuen Schwerpunkten der Forschungsförderung. In vielen Fällen besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf. Der Weg ist noch nicht zu Ende.

Viele industriell erzeugte Produkte gehen bei ihrer Herstellung buchstäblich durchs Feuer. Die Temperaturen, die die Werkstoffe dabei aushalten müssen, sind extrem hoch. In der keramischen Industrie werden die Öfen beispielsweise auf über 1800 Grad Celsius aufgeheizt. Je höher die Temperaturen, desto größer sind die Wärmeverluste. Eine Möglichkeit, die Abwärme zu reduzieren, ist der Einsatz leistungsfähiger Wärmedämmstoffe. Die bislang verwendeten Materialien, konventionelle Feuerleichtsteine oder keramische Faserprodukte, haben jedoch ihre Grenzen: Leichtsteine eignen sich nur für den Einsatz bis zu Temperaturen von etwa 1100 Grad Celsius; Faserwerkstoffe gelten als Krebs



Konvertergas ist ein Nebenprodukt, das bei der Stahlerzeugung anfällt. Die verbesserte energetische Nutzung solcher Prozessgase etwa zur Beheizung von Brennöfen ist Ziel von Forschungsarbeiten.

erregend und erfordern im Umgang aufwändige Verarbeitungs- und Schutzmaßnahmen.

### Hochtemperaturdämmstoffe

Doch es gibt Alternativen. Unter Leitung des Deutschen Institutes für Feuerfest und Keramik in Bonn entwickelten Forscher in einem vom BMWi geförderten Verbundprojekt neue Hochtemperaturdämmstoffe auf der Basis von Calciumhexaaluminat. Die mikroporösen Materialien besitzen hervorragende Wärmedämmeigenschaften, halten Temperaturwechsel gut aus und sind widerstandsfähig gegenüber chemischen Belastungen. Die Praxistests liefen erfolgreich. Würde man beispielsweise in der Ofendecke eines Hubbalkenofens die herkömmlichen Leichtbauteile gegen innovative Dämmstoffe austauschen, ließen sich 30 bis 35 Prozent Energie einsparen. Weiterer Pluspunkt: Die hochleistungsfähigen Werkstoffe sind gesundheitlich unbedenklich und lassen sich bei Bedarf problemlos entsorgen.

Einsatzmöglichkeiten für die neu entwickelten Wärmedämmstoffe gibt es nicht nur in der Keramik-

und Stahlindustrie, sondern auch in der Glasindustrie, der chemischen Industrie sowie in Zementwerken und bei der Müllverbrennung. Allein in Deutschland werden pro Jahr mehr als 100.000 Tonnen Hochtemperaturdämmstoffe gebraucht.

### Drehregenerator

Die Senkung der Abwärmeverluste ist eine Strategie, um den Energieverbrauch in einem Produktionsprozess zu reduzieren. Die zweite Strategie besteht darin, die entstandene Abwärme für die Vorwärmung der Brennluft einzusetzen. Bewährt haben sich zwei Systeme: Bei den Rekuperatoren strömen Abgas und Brenngas gleichzeitig durch die Anlage, zumeist im Gegenstrom. Die Brennluft kann bis zu einer Temperatur von 600 Grad Celsius erwärmt werden. Sind höhere Temperaturen gefragt, kommen Regeneratoren zum Zuge. In diesen Wärmetauschern erfolgt die Wärmeübertragung durch Zwischenspeicherung der Energie in einer Speichermasse.

Herkömmliche Regenerator-Brenner-Systeme bestehen aus mehreren Speichern, die im Wechsel



Die Stahlindustrie ist ein Vorreiter beim Einsatz neuartiger Brenner. Links ein keramisches Heizrohr im Versuchslabor. Keramische Brenner sind wesentlich temperaturfester als solche aus Stahl. Mit ihnen lassen sich auch Hochtemperaturprozesse wirtschaftlich mit Erdgas befeuern, die bisher auf elektrische Energie angewiesen waren. Rechts ein Glühofen, der mit hunderten von keramischen FLOX-Brennern befeuert wird.

thermisch be- und entladen werden. Die Umschaltung bewirkt, dass die Temperaturen von Brennluft und Flamme schwanken. Nicht alle industriellen Prozesse sind diesen unsteten Bedingungen gewachsen. Weiterer Nachteil: Die technische Auslegung konventioneller Systeme lässt Innovationen zur Minderung des Schadstoffausstoßes nur bedingt zu.

Moderne Drehregeneratoren gehen die Dinge anders an. In ihrem Inneren erfolgen das Aufheizen der Brennluft und das Abkühlen des Abgases gleichzeitig, die Brennlufttemperatur bleibt konstant. Ihre Anwendung beschränkte sich bislang auf den Wärmeaustausch bei niedrigen und mittleren Temperaturen, beispielsweise in der Raumlufttechnik. In einem vom BMWi geförderten Forschungsvorhaben wurde das Funktionsprinzip erstmals auf Hochtemperaturprozesse bis 1200 Grad Celsius ausgeweitet und bis zur Anwendungsreife optimiert.

Die Einsatzmöglichkeiten des neu entwickelten Systems aus Drehregenerator und Brenner (DREBS) sind breit gefächert und erstrecken sich von Wärmebehandlungsöfen für Eisen und Stahl über Schmelzöfen für Aluminium und Glas bis hin zu Brennöfen für Keramik. In der Stahlindustrie kann es beispielsweise als Ersatz für das konventionelle Pfannenfeuer dienen, das die Gieß- und Transportpfannen für Roheisen und Stahl erhitzt. Die Energieersparnis ist enorm: Untersuchungen an einem Heizstand für Stahlpfan-

nen in einem Elektrostahlwerk zeigen, dass sich durch den Einsatz der neuen Technologie der Erdgasverbrauch um 45 Prozent senken lässt. Nicht nur die Energieeinsparung macht sich für die Unternehmen bezahlt. DREBS bietet zudem eine Reihe handfester feuerungstechnischer Vorteile, die zu einer Optimierung der Prozessabläufe beitragen.

### FLOX

Die Senkung der Schadstoffemissionen in Hochtemperaturprozessen gehört zu den großen Herausforderungen in der Industrie, an denen die Ingenieure mit Hochdruck arbeiten. Manchmal ist es auch der Zufall, der ihnen bei ihrer Entwicklungsarbeit auf die Sprünge hilft. So bemerkten Forscher vor knapp zwanzig Jahren bei Tests mit einem Rekuperatorbrenner zu ihrer Überraschung, dass das Überwachungsgerät für die Brennerflamme plötzlich kein Signal mehr anzeigte. Auch das Flammengeräusch war verschwunden. Der Brennstoff verbrannte dennoch vollständig. Die Forscher taufte das Phänomen Flammenlose Oxidation (FLOX). Seine Besonderheit: Es bildet kaum schädliche Stickoxide. Dadurch kann Brennluftvorwärntechnik mit hohen Temperaturen eingesetzt werden, die große Energieeinsparungen ermöglicht. In weiteren Experimenten des vom BMWi geförderten Projektes loteten Forscher die Rahmenbedingungen aus, die ein solches Verfahren für den industriellen Einsatz tauglich

machen. Inzwischen leistet eine breite Palette an FLOX-Brennern in der Industrie gute Dienste. „Das Potenzial der Technologie ist jedoch bei weitem noch nicht ausgeschöpft“, sagt Dr. Joachim G. Wüning, Geschäftsführer der WS Wärmeprozess Technik GmbH in Renningen, die das schadstoffarme Verbrennungsprinzip erfolgreich technologisch umsetzt und kontinuierlich weiterentwickelt.

Ein vielversprechendes Einsatzgebiet ist beispielsweise die Verbrennung von Schwachgasen wie Biogas, Holzgas oder Deponiegas. Schwachgase haben im Vergleich zu Erdgas einen geringeren Energiegehalt und enthalten mehr stickstoffhaltige Verbindungen, die Qualität des Brennstoffs schwankt. „Herkömmliche Brenner kommen mit diesen Bedingungen nur schwer zurecht“, sagt Wüning. „FLOX-Brenner meistern die Herausforderungen besser, und die Verbrennung ist sauberer.“

### Prozessgasnutzung

Ein nicht unbeträchtlicher Teil der Energie in industriellen Prozessen verbleibt in gasförmigen Nebenprodukten, beispielsweise Gichtgas, Generatorgas und Raffineriegas. Eine thermische Nutzung wäre lohnenswert: Der Energiegehalt der Prozessgase entspricht nahezu einem Sechstel des Erdgasverbrauches in Deutschland. Allerdings gestaltet sich die praktische Umsetzung als schwierig, unter anderem wegen des geringen Heizwertes der Gase sowie Verunreinigungen, die zu Betriebsstörungen führen können. In mehreren vom BMWi geförderten Projekten arbeiten Forscher des Düsseldorfer Betriebsforschungsinstituts (BFI) an innovativen Verfahren, um die Prozessabläufe bei der Verbrennung der Gase besser zu regeln und unerwünschte Begleitstoffe zu entfernen. Zu den ersten Erfolgen gehört ein mit Aktivkohle oder Aktivkoks gefüllter Reaktor, der die Prozessgase vom Gasstrom trennt. Seine geringe Selektivität sorgt dafür, dass die Palette der adsorbierten Verunreinigungen ungewöhnlich breit ist. Weiterer Pluspunkt: Der Reaktor hat eine lange Laufzeit und verursacht nur geringe Betriebskosten. Die Auswirkungen der optimierten Prozessgassteuerung auf die Energiebilanz zahlen sich aus. Bei vielen wärmetechnischen Anlagen sind Energieeinsparungen von bis zu 10 Prozent möglich.

### Energieeffizientes Recycling

Eine verbesserte Steuerung von Prozessabläufen kann auch beim Recycling von Reststoffen die Energieeffizienz erhöhen. Großes Potenzial birgt vor allem die Wiederverwertung eisenhaltiger Rückstände wie Gichtschlamm oder Walzzunder, von denen die deutsche Stahlindustrie immerhin mehrere 100.000 Tonnen pro Jahr erzeugt. In den Hochöfen der Stahlindustrie lassen sich aus diesen wertvollen Sekundärrohstoffen neue Wertstoffe gewinnen. Da die Rückstände eine wechselnde Zusammensetzung besitzen, sind Recyclingprozesse in konventionellen Hochöfen und Sinteranlagen eine komplexe Angelegenheit und lassen den Brennstoffbedarf um mehr als 50 Prozent in die Höhe schnellen. Bei einer derart komplizierten Prozessführung ist bislang vor allem der Mensch gefragt: Individuelle Entscheidungen der Betriebsmannschaft, die ein hohes Maß an Kompetenz und Erfahrung braucht, sorgen in den Produktionsabläufen für die richtige Weichenstellung.

Um den Mitarbeitern bei der Entscheidungsfindung zu helfen, entwickelte das BFI zusammen mit der DK Recycling und Roheisen GmbH ein rechnergestütztes System, das kontinuierlich die Vorgänge in der Sinteranlage und im Hochofen analysiert und Handlungsvorschläge für das Bedienpersonal liefert. Seine Bewährungsprobe hat das vom BMWi geförderte Steuerungssystem hinter sich. Es wird beim Recycling eisenhaltiger Reststoffe in Sinter- und Hochofenprozessen bereits dauerhaft genutzt. Der Energieeinsatz sinkt dabei um mehr als 10 Prozent. Wirtschaftlich bedeutender Nebeneffekt: Die metallurgische Zusammensetzung des Roheisens lässt sich mit Hilfe des modularen Software-Programms flexibel an die jeweiligen Anforderungen anpassen – die Produktqualität steigt.

### REMIS

Massenartikel aus Kunststoff werden hauptsächlich mit Hilfe des Spritzgießverfahrens produziert. Die Produktpalette reicht von 50 Kilogramm schweren Kunststoffartikeln bis hin zu kleinen Bauteilen, die nur wenige Milligramm wiegen. Die Qualitätsanforderungen sind hoch. Werden nur geringe Abweichungen festgestellt, wird das Spritzgussteil dem



In den Hochöfen der Stahlindustrie lassen sich aus eisenhaltigen Sekundärrohstoffen wie Gichtschlamm oder Walzzunder neue Wertstoffe gewinnen.

Ausschuss zugeordnet. Auch hier lassen sich die Produktionsprozesse mit Hilfe softwaregestützter Steuerungssysteme optimieren. Im Fokus des Verbundprojektes REMIS (Rationelle Energieeinsparung und Minimierung des Materialeinsatzes beim Spritzgießen) stehen beispielsweise „neuronale Netzwerke“ – eine in den letzten Jahren zunehmend eingesetzte Art der Informationsverarbeitung. Diese von der Neurologie inspirierten künstlichen Systeme sind lernfähig, fehlertolerant und können auch unklare Informationen mit einbinden. Um die Software zu „trainieren“, werden im Vorfeld der

Produktionsversuche bei unterschiedlichen Maschineneinstellungen gefahren. Aus diesen Versuchsdaten „erlernt“ das neuronale Netzwerk den Zusammenhang zwischen der Produktqualität und charakteristischen Prozesskenngrößen wie Temperatur und Druckanstieg. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sicherheit bei der Prognose hoch ist. Mit Unterstützung des REMIS lässt sich nach ersten Einschätzungen der Experten rund die Hälfte des Ausschusses in der Kunststoffindustrie vermeiden. Der Energieverbrauch würde um rund 15 Prozent sinken.



Die Qualitätsanforderungen an Spritzgussprodukte der Kunststoffindustrie sind hoch. Schon bei geringsten Abweichungen ist das Produkt häufig unbrauchbar. Ein BMWi-Forschungsprojekt konnte zeigen, dass sich diese Produktionsprozesse mit moderner Software auf Basis neuronaler Netze optimieren lassen.

### Trennen mit wenig Energieaufwand

Die Auftrennung stofflicher Gemische gehört in vielen industriellen Prozessen zum Alltagsgeschäft, sei es bei der Wiederverwertung von Reststoffen, der Trocknung von Produkten, der elektrolytischen Gewinnung von Chlor oder der Dekontaminierung von Abwässern. Traditionelle Trennverfahren, beispielsweise Destillation, erfordern einen hohen Energieeinsatz und sind kostenaufwändig. Können Gemische nicht vollständig getrennt werden, schlägt sich dies in einem erhöhten Entsorgungsaufwand nieder. Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsprojektes entwickelten Wissenschaftler der Henkel KGaA, Düsseldorf, ein Verfahren weiter, das Stoffe mit Hilfe eines Magnetfeldes auftrennt.

Das Grundprinzip ist einfach: Einem Stoffgemisch wird eine Trägerflüssigkeit mit fein verteilten Nanopartikeln, ein so genanntes Ferrofluid, zugegeben.

Die Oberfläche der magnetischen Partikel ist so verändert, dass diese sich gezielt an die abzutrennenden Stoffe anlagern. Durch Anlegen eines starken Magnetfeldes lassen sich die markierten Substanzen separieren. Anschließend werden die Markierungspartikel entfernt und können für einen weiteren Einsatz aufbereitet werden.

Bewährt hat sich dieser Trick bereits in der Molekularbiologie für die Abtrennung von Viren, Bakterien und DNA-Molekülen, eine Anwendung im industriellen Maßstab gab es bislang nicht. Diese Lücke wurde nun geschlossen. Den Forschern gelang es beispielsweise, ein mit Nickel belastetes Abwasser mit magnetisierter Flugasche so gründlich zu reinigen, dass die Schwermetalle nicht mehr nachzuweisen waren. Mit herkömmlichen Verfahren ist dieser Reinigungsgrad nicht zu erreichen. Um Ferrofluide im großtechnischen Maßstab einzusetzen, gilt es, die Technologie noch weiter zu entwickeln. So müssen

die Partikel langzeitstabil, umweltfreundlich und preiswert in der Herstellung sein.

### Wärmepumpen und Kältetechnik

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt im Bereich der Kältetechniken und Wärmepumpen. Die früher als Kältemittel eingesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) bauen das Ozon in der Stratosphäre ab; nach dem Montrealer Protokoll und der deutschen FCKW-Halon-Verbotsverordnung regelt heute die Chemikalien-Ozonschicht-Verordnung die Maßnahmen, welche die Emissionen reduzieren und die Dichtheit von alten Kälteanlagen verbessern – in Neuanlagen sind ozonschädigende Substanzen nicht mehr zugelassen. Viele Kältemittel tragen zudem zur Erderwärmung bei. Es galt, diese Stoffe durch umweltfreundliche und energieeffiziente Alternativen zu ersetzen und entsprechend angepasste Kühlaggregate und Wärmepumpen – wie CO<sub>2</sub>-Kältemaschinen mit Expander, CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen und Zeolith-Adsorptionswärmepumpen sowie Kompressionswärmepumpen mit verbessertem Kreislauf – zu entwickeln. Darüber hinaus standen Dampfstrahlkältemaschinen sowie verbesserte Techniken zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im Fokus.

Aktuelle Projekte befassen sich mit Absorptions- und Adsorptionskälteanlagen kleiner und mittlerer Leistung, solar- und abwärmegetriebenen Kälteanlagen sowie energieeffizienten Anlagen zum Einsatz in Supermärkten. Defizite bestehen immer noch hinsichtlich der Optimierung des Gesamtprozesses aus Kälteerzeugung und Kälteanwendung; daraus ergeben sich weitere Forschungsaufgaben.

### Innovationen in der Stahlindustrie

Stahl ist ein Werkstoff mit langer Tradition. Zum alten Eisen gehört er deswegen noch lange nicht – ganz im Gegenteil. Stahl hat sich mittlerweile zu einem regelrechten Hightech-Produkt entwickelt. Die Nachfrage auf dem Weltmarkt wächst stetig. In den letzten Jahren hat vor allem eine neue Klasse von Stahlwerkstoffen von sich reden gemacht: die so genannten HSD-Stähle (High Strength and Ductility). HSD-Stähle sind außergewöhnlich dehnbar, lassen sich leicht in

Form bringen und weisen eine extrem hohe Festigkeit auf. Diese Materialeigenschaften sind insbesondere für die Automobilindustrie attraktiv. Je dehnbarer der Werkstoff, desto weiter kann man ihn verformen, ohne dass er reißt. Karosseriebleche lassen sich auf diese Weise in der Presse beispielsweise besser in Form bringen. Die fertigen Fahrzeuge sind leichter und energiesparender. Denkbar ist auch der Bau intelligenter Knautschzonen. Nach dem Aufprall ist das Material zunächst verformbar, wandelt sich aber im Bruchteil einer Sekunde in ein härteres Gefüge um und schützt so den Fahrgastraum.

Noch werden die Hightech-Bleche nicht im industriellen Maßstab produziert, da die Schmelze dünnflüssiger ist und mit herkömmlichen Stahlwerkprozessen nur schwer verarbeitet werden kann. Lösen lässt sich dieses Problem durch die Anwendung eines neuen Bandgießverfahrens – des so genannten DSC-Verfahrens (Direct Strip Casting). In einem Kooperationsprojekt zwischen der Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, der Technischen Universität Clausthal und dem Max-Planck-Institut für Eisenforschung haben Forscher eine Pilotanlage entwickelt, um HSD-Leichtbaustähle mit dem DSC-Verfahren herzustellen.

#### Expertenwissen für die Produktentwicklung

Bei der Entwicklung neuer Produkte spielen die Faktoren „Zeit“ und „Information“ eine wichtige Rolle. Denn die Entwickler verbringen einen nicht unerheblichen Teil ihrer Zeit damit, Informationen zu beschaffen und auszuwerten. Dabei nutzen die Experten mittlerweile häufig das Internet. Die Vollständigkeit und Übersichtlichkeit des vorhandenen Datenmaterials lässt allerdings oftmals zu wünschen übrig, so dass weitere Recherchen nötig sind. Der Konkurrenzdruck verkürzt die Entwicklungszeiten zusätzlich. Innovationen drohen dem Zeitdruck zum Opfer zu fallen. Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projektes „E2ProNet“ haben Forscher die Internetplattform LCE-Guide ([www.lce-guide.de](http://www.lce-guide.de)) entwickelt, die ganzheitliche Informationen zu innovativen Materialien und Technologien bereitstellt. Zielgruppe sind Hersteller und Produktentwickler aus der Elektro- und Automobilindustrie sowie aus weiteren Branchen. Der Unterschied zu anderen Datenbanken: Die Wissensdatenbank ist modular aufgebaut und bietet eine Fülle von Dokumenten und Einzelinformationen. Umfangreiche Tests in der betrieblichen Praxis laufen. Forscher des KERP Kompetenzzentrums Elektronik & Umwelt in Wien haben bereits mit Hilfe des LCE-Guides eine „Öko-Maus“ für den Computer entwickelt. Die optische Funkmaus kommt ohne Batterien und Akku aus und wird über eine alternative Energieversorgung gespeist, die sich auf Doppelschichtkondensatoren und eine spezielle Schaltung stützt.





Ein Ofen zur Herstellung von Elektrostaahl verbraucht leicht so viel Strom wie eine Kleinstadt. Mit Öfen, die nach dem Schaumslagke-Verfahren arbeiten, kann man den spezifischen Stromverbrauch um etwa 5 Prozent senken.

Da das Anlagendesign sehr kompakt ist, entfallen bei dieser Technologie einige energieintensive Arbeitsstufen, so dass das DSC-Verfahren mit rund 25 Prozent des sonst üblichen Energieaufwandes auskommt. Darüber hinaus toleriert es höhere Schrottanteile. Die Entwicklung der Produktionsprozesse ist mittlerweile so weit fortgeschritten, dass vielleicht schon im Jahr 2010 die ersten Autos mit Bauteilen aus HSD-Stahl über die Straßen rollen werden.

Innovationen gibt es auch in anderen Bereichen der Stahlindustrie. Allein der Begriff „Stahl“ beinhaltet mehr als 2200 Sorten, die sich in ihren Legierungen und Materialeigenschaften unterscheiden. Rund 19 Prozent der Produktion in Deutschland entfallen auf den Edelstahl. Eines der Verfahren zur Stahlherstellung ist das Schmelzen von Stahlschrott mit Hilfe elektrischen Stroms. Um diesen Prozess effizienter zu machen, setzen die Ingenieure dabei auf das so genannte Schaumslagkeverfahren: Schaumbildner wie Kohlenstoff oder Sauerstoff erzeugen auf der Oberfläche des geschmolzenen Stahls einen Schlackenschaum, der wie ein Wärmepolster wirkt und den Energiebedarf senkt. Bei Edelstahl mit

hohem Chromanteil funktionierte das Verfahren bislang nicht, da die Schlacke zu steif und zu reaktionsträge war. Unter Förderung des BMWi entwickelten Forscher des BFI zusammen mit Industriepartnern jetzt eine Variante des Schaumslagkeverfahrens, die unter anderem auf das Einblasen von Kohle setzt. Die Methode hat Potenzial: Der Stromverbrauch bei der Edelstahlherstellung lässt sich auf diese Weise um rund fünf Prozent senken.

#### Ausblick

Künftige Schwerpunkte der BMWi-Förderung im Bereich der effizienten Energienutzung in Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen werden unter anderem in der Hochtemperatursupraleitung liegen, der innovativen Motorenentwicklung für stationäre Anwendungen, im Demand-Side Management, bei intelligenten Netz-, Meß- und Steuerungsdienstleistungen, bei der Herstellung und Anwendung von Leichtbaumaterialien wie etwa ultrahochfesten Stählen sowie bei den Forschungsthemen Werkstoffeffizienz und energieeffizientes Recycling.

## Effiziente Stromnutzung, Speicher

Der deutsche Strommarkt hat sich in den vergangenen Jahren radikal gewandelt. Die Liberalisierung auf europäischer Ebene führte zur Öffnung der Netze und initiierte erstmals Konkurrenz unter den Stromversorgern. Dadurch wurde es Verbrauchern ermöglicht, ihren Versorger frei zu wählen. Auch die Versorgungslandschaft hat deutlich ihr Gesicht verändert. Das Erneuerbare-Energien-Gesetz verpflichtet seit dem Jahr 2000 Netzbetreiber, Strom aus regenerativen Energiequellen abzunehmen und nach festen Sätzen zu vergüten. Dies hat der Stromerzeugung aus Sonne, Wind und Biomasse kräftig Schub verliehen. Ehrgeizige europäische Ziele im Klimaschutz und der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten werden den Ausbau Erneuerbarer Energien auch künftig vorantreiben. Außerdem wächst durch die stark steigende Zahl von Photovoltaik-Anlagen, Windparks oder Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung, die in der Regel dezentral Strom erzeugen, die Zahl der am Energiemarkt beteiligten Anbieter.

### Stromnetze der Zukunft

Deutschland verfügt heute über ein stabiles Stromnetz. Jeder Bürger und jedes Unternehmen profitiert von den Vorteilen einer hohen Versorgungssicherheit. Dennoch stehen die existierenden Netzstrukturen vor einem großen technologischen Wandel. Durch die zunehmende Dezentralisierung auf der Angebotsseite und die steigenden Erwartungen bzgl. einer effizienteren Übertragung und Verteilung elektrischer Energie werden immer höhere Anforderungen an die Flexibilität und Aufnahmefähigkeit der gesamten Netzstruktur gestellt. Gleichzeitig sollen keine zusätzlichen Beeinträchtigungen bei der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Stromversorgung entstehen. In Zukunft werden daher durch diese geänderten Bedingungen völlig neue Netzkonfigurationen erwartet.

Neueste technologische Entwicklungen z.B. im Bereich moderner Informations- und Kommunikationstechniken (IuK) bieten Versorgern und Netzbetreibern erhebliche Chancen für neue Versorgungsmodelle, was mit dem Begriff „Smart Grids“ in Verbindung gebracht wird. Beispielhaft ist hier das Konzept eines „Virtuellen Kraftwerks“ zu nennen – das ist die Zusammenschaltung kleiner, dezentraler

Stromlieferanten zu einem Verbund mit gemeinsamer Steuerung. Die sich rasant entwickelnden IuK-Technologien eröffnen in der Übertragung, Verteilung und Nutzung von Strom ein großes Erneuerungspotenzial. Hierfür hat das BMWi den Förderwettbewerb „E-Energy: IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft“ im Rahmen der Multimediaforschungsförderung gestartet.

Weitere Innovationen wie z.B. in der Materialentwicklung oder der Elektronik und neueste Erkenntnisse der Grundlagenforschung können gezielt zur Weiterentwicklung intelligenter Netzstrukturen aufgegriffen werden. So sind neueste Entwicklungen im Bereich der Hochtemperatur Supraleitung (HTSL) ein vielversprechender Ansatz für verlustarme, d.h. effiziente Stromübertragung. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Entwicklung moderner Stromversorgungsstrukturen ist die einsetzende Elektrifizierung der Mobilität. Hybrid-, Plug-in Hybridfahrzeuge und reine Elektrofahrzeuge sind auf dem Markt erhältlich bzw. in der Entwicklung oder im Probetrieb. Hieraus ergeben sich zusätzliche Absatzmärkte für elektrische Energie, aber auch langfristige Möglichkeiten zur Regelung der Netze. Dies ist insbesondere in Verbindung mit der gleichzeitig zunehmenden Einspeisung aus fluktuierenden Energiequellen wie z.B. Offshore Windanlagen zu sehen. Im Rahmen des Integrierten Energie- und Klimaprogramms der Bundesregierung (IEKP) werden die Bemühungen zur Verstärkung von Forschung, Entwicklung und Erprobung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen erheblich ausgeweitet. Bei der Umsetzung dieser Maßnahmen arbeiten die vier Ressorts BMWi, BMVBS, BMU und BMBF zusammen.

### Speicher für die Stromnetzregelung

Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien ist der Anteil der Erzeuger mit schwankender Einspeisung deutlich gestiegen. So decken Windkraftanlagen bereits heute den Strombedarf in Deutschland zu mehr als 6 Prozent. Allerdings kann Windstrom nur dann geerntet werden, wenn der Wind weht. Dies deckt sich jedoch häufig nicht mit den Zeiten, in denen die Stromnachfrage besonders groß ist. Eine wichtige Rolle in diesem Zusammenhang spielen Stromspeicher. Bisher sehr verbreitet sind **Pumpspeicherkraftwerke**. Sie nehmen den preiswerten

Strom auf, der nachts in Grundlastkraftwerken erzeugt wird, und wandeln ihn in potenzielle Energie um, indem sie Wasser hochpumpen. Tagsüber, wenn Lastspitzen auftreten, treibt das gespeicherte Wasser Turbinen an und erzeugt wieder elektrische Energie. Somit tragen Pumpspeicherkraftwerke erheblich zur Regelbarkeit der Netze bei und können wirtschaftlich betrieben werden, da sich der Strom in Spitzenlastzeiten erheblich teurer anbieten lässt, als er nachts gekostet hat. Die Problematik der Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage wird durch den Ausbau der Offshore-Windenergienutzung verschärft. Die Möglichkeiten, in Deutschland weitere Pumpspeicherkraftwerke zu bauen, sind aufgrund der geologischen Gegebenheiten sehr stark eingeschränkt. Deshalb besteht heute ein erheblicher Bedarf an der Entwicklung weiterer Technologien, die zur Speicherung von Strom im großen Maßstab geeignet sind.

Als Stromspeicher mit potenziell hohen Kapazitäten für die Zwischenspeicherung des Stroms aus Windkraftanlagen bieten sich **Druckluftspeicherkraftwerke** an. In diesen Speichern wird mit Strom Luft stark komprimiert und beispielsweise in Salzstöcken gespeichert. Bei Bedarf wird die Pressluft über eine Gasturbine wieder verstromt. Durch die Nutzung der Pressluft kann die für den Gasturbinenprozess energieaufwändige Luftverdichtung entfallen. Im norddeutschen Huntorf ging bereits Ende der 70er Jahre das weltweit erste Druckluftspeicherkraftwerk in Betrieb. Die dort gespeicherte Energie kann mit einer Leistung von etwa 320 Megawatt über einen Zeitraum von zwei Stunden abgegeben werden. Eine Weiterentwicklung sind adiabate Druckluftspeicherkraftwerke. Sie speichern nicht nur die Druckluft, sondern auch die Wärme, die beim Verdichten frei wird. Diese Entwicklung steht allerdings noch weitgehend am Anfang, denn hierfür müssen nahezu alle Komponenten – Wärmespeicher, Kompressoren, Gasturbinen – neu überdacht werden. Generell gilt: Speicherkraftwerke können nicht den gesamten Bedarf an Regelenergie decken, sind aber in der Lage, einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung von Lastspitzen und damit des Bedarfs an zusätzlichen Netzausbauten zu leisten.

Die Tatsache, dass Speicher für elektrische Energie in den beispielhaft genannten Anwendungen angeboten werden, darf nicht darüber hinweg täu-

schen, dass bei diesen Technologien noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf besteht. Forscher suchen hier auf Basis ganz unterschiedlicher physikalischer und chemischer Phänomene nach innovativen Lösungen für die Speicherung der elektrischen Energie. Dabei müssen sie berücksichtigen, dass jeder Anwendungsfall spezifische Anforderungen an den Speicher stellt.

Eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Speichern für elektrische Energie wird aber auch noch durch einen weiteren wichtigen Aspekt gefordert. Schon kleine, für private Haushalte kaum merkbare Netzstörungen können bei sensiblen Verbrauchern (Industrieprozesse, Rechenzentren usw.) zu großen wirtschaftlichen Schäden führen. Durch die Zwischenspeicherung von Strom am Ort des Verbrauchers und die Entnahme von Strom aus dem Zwischenspeicher im Falle einer Störung können Netzunregelmäßigkeiten ausgeglichen werden. Zur Überbrückung von Netzstörungen bieten sich **Schwungmassenspeicher** an, die als Kurzzeitspeicher solche Störungen abfangen können. Industriebetriebe nutzen zum Beispiel diese Technik, um Störungen in der Produktion zu vermeiden. Darüber hinaus sorgen Schwungmassenspeicher in Stromnetzen mit einem hohen Anteil von dezentralen Energieerzeugern für höhere Stabilität, da sie die fluktuierende Einspeisung mit Spitzenleistungen von einigen hundert Kilowatt im Sekunden- oder Minutenbereich ausgleichen. Somit kommt diese Technik nicht nur dem Nutzer, sondern auch dem Netzbetreiber zugute. Schwungmassenspeicher verfügen zwar nicht über hohe Speicherkapazitäten, dafür können sie aber hohe Ströme in kurzer Zeit abgeben – das heißt eine sehr hohe Leistung zur Verfügung stellen, was optimal für sensible Produktionsmaschinen oder Verbraucher mit kurzen, aber hohen Lastspitzen ist. Beispielsweise können Straßen- oder S-Bahnen mit diesen Speichern Bremsenergie für das nächste Anfahren nutzen. In dem vom BMWi geförderten Forschungsprojekt „Dynastore“ wurde ein kompakter, leichter und flexibel einsetzbarer Schwungmassenspeicher entwickelt. Das ringförmige Schwungrad besteht aus einem speziellen kohlefaserverstärkten Kunststoff, und der Schwungring dreht in Lagern mit Permanentmagnet und eigens entwickelten Hochtemperatur (HT)-Supraleitern. Der HT-Supraleiter ermöglicht das berührungsfreie Lagern der Schwung-



Modell „Dynastore“: Schwungmassenspeicher der neuen Generation sind in wenigen Jahren anwendungsreif, um Elektrizität kinetisch zu speichern.

masse, so dass auch bei hohen Drehzahlen nur geringe Reibungsverluste auftreten.

Supraleitende Magnetische Energiespeicher (SMES) speichern Gleichstrom in einem durch eine supraleitende Spule erzeugten Magnetfeld. SMES sind sehr effizient, beim Speichern selbst geht kaum Energie verloren. Andererseits ist die Kühlung der Spule recht energieaufwändig und HT-Supraleiter sind noch teuer. In einem ersten Schritt bieten sich SMES daher zur kurzzeitigen Speicherung von Energie an.

### Speicher für den Verkehr

Neben dem erwähnten Bedarf für Stromspeicher zur Netzregelung wächst hierzulande auch die Nachfrage nach effizienten Stromspeichern für Fahrzeuge. Im Hybridauto beispielsweise wird ein Teil der Energie, die der Motor erzeugt, als elektrische Energie an Bord gespeichert und während des Anfahrvorgangs wieder abgegeben. Weiterhin besteht durch dieses Konzept die Möglichkeit der Nutzung und Speicherung der Bremsenergie. Von diesen Fahrzeugen sind ein effizienterer Betrieb und somit Einsparungen beim Brennstoffverbrauch zu erwarten.

Super-Kondensatoren (so genannte **Supercaps**) haben eine besonders hohe Leistungsdichte. Aufgrund ihrer hohen Lebensdauer eignen sich Doppelschicht-Kondensatoren als Ersatz für herkömmliche

Akkumulatoren, wenn eine hohe Zuverlässigkeit gefordert und ein häufiges Laden und Entladen mit ihrem Einsatz verbunden wird. Supercaps können im Vergleich zu Akkumulatoren deutlich schneller geladen werden und erhöhen somit die Verfügbarkeit der Geräte. Ein weiterer Vorteil ist der im Vergleich zu anderen Speichersystemen wesentlich einfachere Ladevorgang. Ein besonders interessantes Beispiel für die Nutzung von Supercaps wird in Hybridfahrzeug-Anwendungen gesehen. Hier können sie in Kombination mit einem Verbrennungsmotor und einer Batterie energiesparend zusammenwirken: Während die Supercaps eine Verbesserung der Fahrzeugbeschleunigung bewirken, leistet die Batterie einen Beitrag zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs. In einem weiteren Schritt wäre der Ersatz des Verbrennungsmotors durch eine Brennstoffzelle anzustreben.

### Elektrochemische Speicher

**Elektrochemische Speicher** wie Batterien oder Akkumulatoren haben bereits ihren Platz in vielfältigen Anwendungen gefunden, etwa in Computern, Taschenlampen oder Starterbatterien, die in großer Stückzahl für die Automobilindustrie hergestellt werden. Allerdings bedarf es noch erheblicher Investitionen in die Technologieentwicklung, denn die heute vorhandenen Batteriesysteme sind für die angestrebten Anwendungen etwa im Auto oder in Stromnetzen teilweise zu groß oder zu schwer, und sie müssen insgesamt kostengünstiger, effizienter und noch sicherer werden.

Elektrochemische Speicher unterliegen in beiden Anwendungsfällen unterschiedlichen Kriterien. So ist im mobilen Sektor ein möglichst geringes Gewicht der Batterie anzustreben, bei einem stationären Einsatz spielt das Gewicht hingegen eher eine untergeordnete Rolle. Dagegen möchte man bei stationären Anwendungen eine hohe Speicherkapazität bei vertretbaren Kosten erzielen.

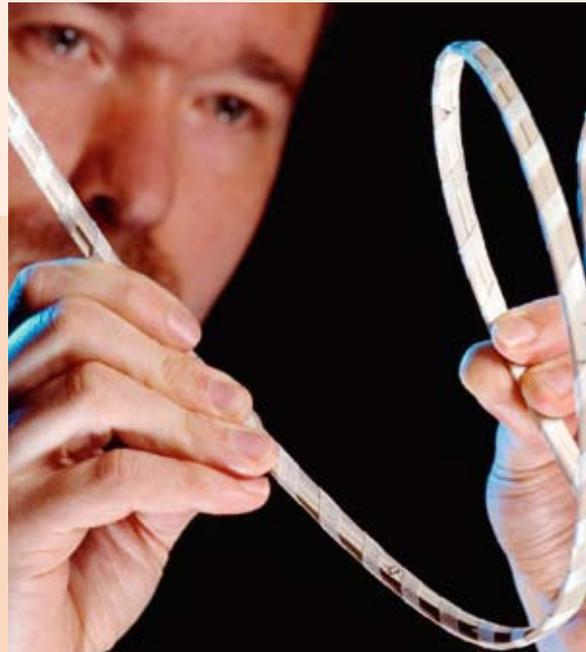
Für beide Anwendungsfälle gelten elektrochemische Speicher auf **Lithium-Ionen-Basis** als vielversprechende technologische Alternative zu den etablierten Batterietechnologien. Ihr entscheidender Vorteil ist eine sehr viel höhere Speicherdichte, und

zudem verfügen sie über ein hohes Entwicklungspotenzial. Lithium-Ionen-Batterien werden bereits heute in unzähligen Kleingeräten mit geringem Energiebedarf wie zum Beispiel Uhren oder Handys verwendet. Um sie künftig auch im Auto oder im Stromnetz wirtschaftlich einsetzen zu können, bedarf es aber noch großer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Die Verbesserungsmöglichkeiten reichen von der Verwendung neuer Materialien über die vereinfachte Fertigung zur Reduzierung der Herstellkosten bis zur Erhöhung der Sicherheit für den Benutzer. Forschung, die sich lohnt, denn letztlich ist überhaupt nur ein Lithium-Ionen-System mit einem sehr hohen Sicherheitsstandard für eine Verwendung in Hybrid- und Elektrofahrzeugen sinnvoll.

### Ausblick

Elektrospeicher werden die künftige Stromversorgungslandschaft entscheidend beeinflussen. Das BMWi wird zur Vorbereitung seines neuen Förderkonzepts „**Stromnetze der Zukunft**“ Fachgespräche durchführen, die zur Formulierung eines Forschungs- und Entwicklungsplans beitragen sollen. In Verbindung mit dem bereits angelaufenen Förderkonzept „**Stromspeicher**“ bildet der zunehmende Bedarf an Speichersystemen für elektrische Energie in den Stromnetzen und der Automobiltechnologie einen wesentlichen Schwerpunkt. Dabei gilt der Lithium-Ionen-Batterie das Hauptaugenmerk: Die Erhöhung ihrer Speicherkapazität und ihrer Zyklenfestigkeit sind die zentralen Fragen für die Forschung. Aber auch andere Speichertechnologien wie etwa die Druckluftspeicher werden in der neuen Fördermaßnahme berücksichtigt. Die Förderung der innovativen Technologieentwicklungen folgt dem Ziel der Kostensenkung, um Wirtschaftlichkeit zu erlangen bzw. zu verbessern. Gleichzeitig wird das Konzept offen sein für die Grundlagenforschung, um schnell auf neue Erkenntnisse und viel versprechende Konzepte und Verfahren reagieren zu können.

An den im Rahmen des IEKP der Bundesregierung beschlossenen Maßnahmen zur Elektromobilität wird sich das BMWi nicht nur mit seinen Aktivitäten im Bereich Speicher und Netze beteiligen, sondern auch durch systemanalytische Untersuchungen zu den Möglichkeiten und Grenzen einer strom-



Wicklungen aus supraleitenden Drähten erhöhen die Leistungsdichte von Motoren.

basierten Mobilität mittels Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Wesentlicher Schwerpunkt der Untersuchungen wird die Analyse und Bewertung der Auswirkungen der in den Fahrzeugen vorhandenen Stromspeicher auf Lastflüsse, Netzstabilität und Betriebsverhalten sowohl der regenerativen als auch der konventionellen Stromerzeugungsstrukturen sein. Erste Ergebnisse werden in 2009 erwartet. Hieraus können sowohl Handlungsanweisungen im Hinblick auf den Netzum- und ausbau, die Integration erneuerbarer Energien oder den Einsatz intelligenter Zähl- und Kommunikationstechniken abgeleitet, als auch konkrete Vorschläge zu weiteren Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen ausgearbeitet werden.

### Supraleitung

Wenn Strom fließt, werden die Leitungen normalerweise warm. Bei Supraleitern ist das anders: Sie transportieren Strom quasi ohne Verluste. Besonders auf Hochtemperatur (HT)-Supraleiter, bei denen eine Kühlung mit flüssigem Stickstoff ausreicht, damit sie Strom widerstandsfrei transportieren, setzt die Energiewirtschaft große Hoffnungen. HT-Supraleiter können die Effizienz von Stromerzeugung, -transport und -verbrauch steigern, besonders wenn hohe Leistungen gefragt sind. Sie lassen sich aus gängigen Materialien herstellen und sind meist keramikähnliche Verbindungen, die weder verschleifen noch für Mensch und Umwelt toxisch sind. Supraleitende Strombegrenzer beispielsweise können Drosselspulen ersetzen oder Transformatoren überflüssig machen. Sie schützen das Netz vor Überlastung und Kurzschlüssen. Weitere Anwendungsfelder sind unter anderem Motoren, Generatoren und Induktionsöfen.

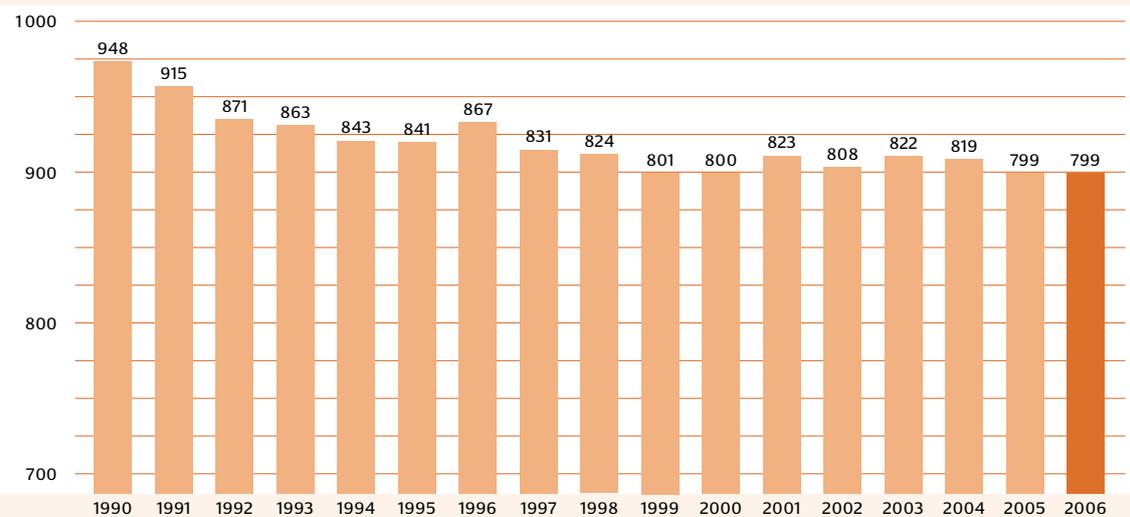


# Effiziente Energieumwandlung

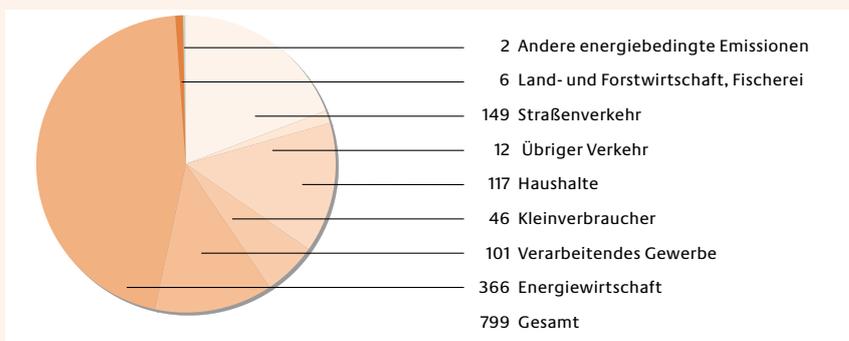
Brennstoffzellen gelten als eine Schlüsseltechnologie für eine nachhaltige Energieversorgung und stehen deshalb im Fokus der Energieforschung und -entwicklung. Ihr Prinzip ist genauso einfach wie genial: Bei der Verschmelzung von Wasserstoff und Sauerstoff werden in einem einzigen Schritt Strom und Wärme gewonnen.

Noch wird Strom in Deutschland allerdings zu etwa 60 Prozent in Kraftwerken erzeugt, die mit Braunkohle, Steinkohle, Erdgas oder Erdöl – also mit fossilen Energieträgern – betrieben werden. Hier kommt es darauf an, den Wirkungsgrad zu verbessern – um Brennstoff einzusparen und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden.

Energiebedingte Emissionen von Kohlendioxid (Deutschland 1990–2006) in Millionen Tonnen (Mt)



Energiebedingte Emissionen von Kohlendioxid (Deutschland 2006) in Millionen Tonnen (Mt) nach Sektoren



Quelle: BMWi/UBA, Stand 08.07.2008

Bei der Verbrennung fossiler Energieträger wird das Klimagas Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) freigesetzt. Die steigende Konzentration von CO<sub>2</sub> und anderen Spurengasen in der Atmosphäre trägt nach vorherrschender Einschätzung der Wissenschaft zur Verstärkung des Treibhauseffekts und damit zur Erwärmung des Erdklimas bei. Ressourcenschonung und Klimaschutz sind deshalb bei energiepolitischen Maßnahmen zu berücksichtigen, wobei der effizienten Energieumwandlung und der Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen eine zentrale Bedeutung zukommt.



Brennstoffzellen, Multitalente für vielfältige Einsatzgebiete, wandeln effizient und umweltfreundlich Energie um. Zwar stecken sie noch in den Kinderschuhen, aber die Forschung schreitet mit Riesenschritten voran. Ein Gespräch mit Prof. Dr. Werner Tillmetz, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Ulm.

## „Brennstoffzellen sind eine attraktive Alternative“

? Wo sehen Sie die zentralen Vorteile der Brennstoffzelle im Vergleich zu anderen technischen Systemen?

! Es gibt zwei prinzipielle Vorteile: Zum einen haben Brennstoffzellen im Vergleich mit Verbrennungskraftmaschinen einen sehr viel höheren Wirkungsgrad. Nehmen Sie folgendes Beispiel: Das Auto, mit dem wir heute früh zur Arbeit gefahren sind, hat einen Wirkungsgrad von etwa 20 Prozent. Das heißt: 80 Prozent der Energie, die im teuren Kraftstoff steckt, wird als heiße Luft in die Umgebung geblasen. Schon die heute verfügbaren Brennstoffzellenantriebe erreichen einen doppelt so hohen Wirkungsgrad.

Zweites Thema ist die Emissionsfreiheit. Die treibende Kraft, die zum Beispiel die Automobilindustrie seit Jahren dazu bewegt, intensiv Brennstoffzellen für den Pkw-Antrieb zu entwickeln, ist die Null-Emissions-Gesetzgebung in Kalifornien. Ziel dieser Vorgaben ist ein Verkehr ohne Emissionen, das heißt keine Partikel, keine Stickoxide, keinerlei Schadstoffe.

Hinzu kommt die Frage, wie man die Energieversorgung des Verkehrs in Zukunft diversifizieren, das heißt auf eine breitere und unabhängigere Treibstoff-Basis stellen kann. Derzeit gilt rund um den Globus noch das Monopol des Erdöls. Aber die Ressourcen gehen in absehbarer Zeit zu Ende, und Alternativen sind dringend gefragt. Die attraktivste Alternative, die ich gerade für mobile Anwendungen sehe, sind Wasserstoff und Brennstoffzelle.

? Wo besteht derzeit der größte Bedarf an Forschung und Entwicklung auf diesem Sektor?

! Ein großer Bedarf besteht in der Optimierung der bereits heute in der Felderprobung befindlichen Technologien. Diejenigen Unternehmen, die Brennstoffzellen kurz- oder mittelfristig auf den Markt bringen wollen, benötigen eine effiziente Unterstützung durch Forschungseinrichtungen. Entwicklungsziele sind dabei zum einen die Robustheit und Zuverlässigkeit der technischen Systeme, also ihre Widerstandsfähigkeit gegen die Belastungen des Alltagsbetriebes. Ein zweites entscheidendes Ziel ist eine ausreichende Lebensdauer. Und drittens geht es darum, diese Anforderungen mit kostengünstigen Komponenten und Systemen zu verwirklichen.

Aber auch im Bereich der Grundlagenforschung gibt es noch zentrale Fragen: Das eine sind kostengünstige und wirkungsvolle Katalysatoren, vor allem

für die Sauerstoffreduktion. Das andere sind leistungsfähige Speichersysteme für Wasserstoff.

Wir dürfen aber nicht vergessen: Verbrennungsmotoren gibt es jetzt seit über 100 Jahren. Dennoch wird heute auf der ganzen Welt noch sehr viel in Grundlagenforschung investiert, um diese Motoren noch effektiver zu machen. Die Brennstoffzelle steht da im Vergleich noch am Anfang ihrer Karriere. Das heißt: Wir werden noch sehr viele Jahre Forschung betreiben, um diese Systeme kontinuierlich weiterzuentwickeln und um die Wettbewerbsfähigkeit unserer Industriepartner zu erhalten.

? Es gibt Kritiker, die vom Einstieg in die „Wasserstoff-Welt“ abraten. Das Argument lautet: Die Umwandlung und Speicherung von Energie kostet selbst viel Energie.

! Es ist schade, dass diese Diskussion so emotional ausgetragen wird. Das Thema sollte man differenzierter betrachten. Natürlich: Wenn man den erzeugten Strom sofort nutzen kann, wäre es unsinnig, ihn zuvor noch umzuwandeln. Aber da gibt es auch andere Phasen: Wenn die Sonne nicht scheint, oder wenn der Wind nicht weht, dann liefern erneuerbare Energien wie Solar- und Windkraft keinen Strom. Aus diesem Grund gibt es im Stromnetz in Zukunft immer mehr zum Teil nicht vorhersagbare Fluktuationen. Speichersysteme werden also auf jeden Fall benötigt.

Das andere Thema ist die Mobilität: Manche sagen, warum bauen wir nicht gleich Batterie-Fahrzeuge? Aber das Problem ist folgendes: Wenn wir Batterie-Fahrzeuge mit gleicher Reichweite und Betankungszeit wie heutige Fahrzeuge haben wollen, dann müssen wir noch sehr lange auf geeignete Batterien und Ladestationen warten. Ein Beispiel: Der derzeitige Hoffnungsträger in diesem Bereich, die Lithium-Ionen-Batterie, ist heute beherrschbar in der Kategorie bis zu 50 Wattstunden. Das ist die Energie, die ein Notebook braucht. Ein reiner Batterie-Pkw benötigt fast das Tausendfache an Energiespeicher. Bis eine solche Batterie sicher, kostengünstig und serientauglich auf den Markt kommt, wird noch viel Zeit vergehen. Dagegen ist die Entwicklung bei der Brennstoffzelle schon weiter vorangeschritten.

Langfristig wird es zwei Energieträger geben, die beide aus erneuerbaren Energien erzeugt werden: elektrischen Strom und Wasserstoff – beide sind einfach ineinander umwandelbar.

## Brennstoffzellen und Wasserstoff

Die weltweite Energieversorgungs-, Umwelt- und Klimasituation erfordert Veränderungen bei den Energiewandlungsverfahren und der Energieträgerauswahl. Fortschrittliche Lösungen sind gefragt: Brennstoffzellen und neue Energieträger wie Wasserstoff werden zunehmend dazu beitragen müssen, Energie sicher, effizient und sauber umzuwandeln sowie wirtschaftlich zu nutzen. Für eine erfolgreiche Entwicklung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien ist eine Bündelung der notwendigen Ressourcen erforderlich. Hierzu tragen schon heute europäische Programme (Rahmenprogramme, Joint Technology Initiative) bei, zudem die deutschen Programme (Energieforschungsprogramm, Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie) und insbesondere die regionalen Netzwerke für Brennstoffzellen und Wasserstoff. Zusammen schaffen sie optimale Voraussetzungen für einen mittel- bis langfristig erfolgreichen Lösungsansatz.

### Warum brauchen wir neue Energieträger?

Fortschrittliche Energieversorgungssysteme sind immer auch mit der Frage nach dem richtigen Umgang mit den verfügbaren Energieträgern verknüpft. Darum gilt es,

- ▶ eine langfristige, sichere, wirtschaftliche und umweltfreundliche Bereitstellung von Primärenergien,
- ▶ die Herstellung einzelner Endenergieträger aus verschiedenen Primärenergien mit hoher Effizienz,
- ▶ einen zunehmenden Einsatz regenerativer Primärenergien zu erreichen.

Dabei wird dem zukünftigen Energieträger Wasserstoff eine besondere Bedeutung in der Energiewirtschaft zukommen, weil er gleichzeitig für konventionelle wie auch zukünftige Energieumwandlungssysteme – zum Beispiel Brennstoffzellen – genutzt und aus unterschiedlichen Primärenergieträgern hergestellt werden kann. Eine stärkere Einbindung erneuerbarer Energien zur Wasserstoffherstellung setzt dabei hinreichend große Potenziale, ausreichende Verfügbarkeit bei konkurrenzfähiger

Kostensituation sowie die Schaffung neuer Infrastrukturen voraus.

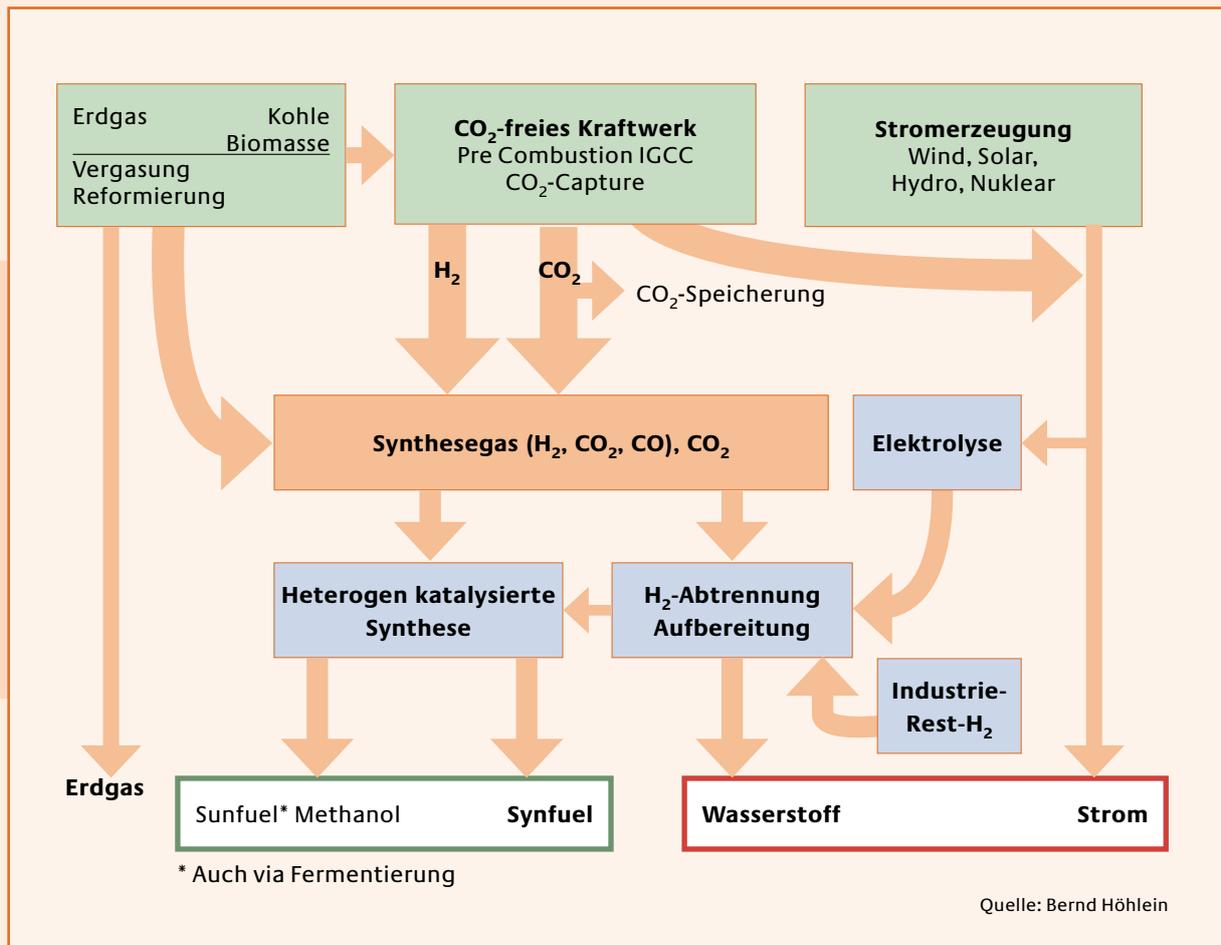
### Wozu brauchen wir Wasserstoff als Energieträger?

Langfristig werden Wasserstoff und Elektrizität als Versorgungseinheit große Bedeutung erlangen. Elektrischer Strom kann direkt ins Versorgungsnetz eingespeist und dabei sogar noch zur Übertragung von Informationen genutzt werden. Wasserstoff verfügt durch seine Speicherfähigkeit über einen Vorteil gegenüber der Elektrizität, der seine Verwendung gerade in mobilen Anwendungen und zum Ausgleich der Fluktuationen der Stromerzeugung aus Solar- oder Windenergie attraktiv macht. Wasserstoff und Elektrizität sind wechselseitig konvertibel und erlauben im Versorgungssystem eine höhere Flexibilität. Sie sind daher Säulen einer komplementären zukünftigen Energiewirtschaft. Beide Energieträger lassen sich auf fossiler, nicht-fossiler und regenerativer Basis herstellen. Somit eröffnet sich langfristig die Möglichkeit einer CO<sub>2</sub>-freien Erzeugung.

Die Wasserstoffnutzung kann im Rahmen eines weiten Spektrums stationärer, mobiler sowie portabler Anwendungen erfolgen. Hierfür werden Motoren und Turbinen entwickelt sowie Brennstoffzellen als hocheffiziente elektrochemische Energiewandler. Im Bereich der mobilen Anwendung lässt sich Wasserstoff direkt als Brenngas in Niedertemperatur-Brennstoffzellen für Elektroantriebe nutzen. Dabei werden die lokalen und globalen Emissionen je nach Art der Wasserstoffbereitstellung im Vergleich zu heutigen Umwandlungssystemen mit konventionellen Energieträgern sehr niedrig sein.

Schon heute lassen sich Meilensteine auf dem Weg zu einer wasserstofforientierten Energiewirtschaft erkennen:

- ▶ Frühe Märkte für kleine (portable) Anwendungen werden vorbereitet beziehungsweise bereits erschlossen.
- ▶ Ein Fahrzeugmassenmarkt wird für 2020 angestrebt.



Aufbau eines Energiesystems für den Verkehr ohne Erdöl

- ▶ Erste Infrastrukturen für beide Anwendungen müssen heute in Clusterlösungen, nicht aber großflächig vorbereitet werden.
- ▶ Vorhandene Überschusskapazitäten, insbesondere industrieller Restwasserstoff, sind bei entsprechender Aufbereitung frühzeitig nutzbar.
- ▶ Für den Einsatz in ersten Versorgungsclustern eignen sich mobile Tankstellen oder erweiterte konventionelle Tankstellen, bei denen Wasserstoff per Trailer oder per Pipeline bzw. bei zentraler Abfüllung in Kartuschen angeliefert wird.
- ▶ Großer Handlungsbedarf besteht beim Aufbau der Logistik für die Wasserstoffbereitstellung. Herausforderungen sind unter anderem die Reinheit des Gases, die Druckanpassung, die Speicherung, die Sicherheit, der Wasserstofftransport zum Kunden und die Strukturierung der Wasserstoffabgabe an den Tankstellen. Zudem gilt es, eine hinreichende Kundenakzeptanz zu erreichen.

Neue Wasserstoff-Erzeugungskapazitäten werden erst für den Fahrzeugmassenmarkt nach 2020

benötigt. Allerdings sollten die Weichen für eine zukunftsfähige Auswahl der Erzeugungskapazitäten schon heute gestellt und der noch zu leistende Entwicklungsbedarf zügig begonnen werden.

### In welchem Umfang brauchen wir langfristige Lösungen mit Wasserstoff?

Eine neue Energiewirtschaft mit komplementärer Versorgungsstabilisierung wird sich in Europa nur allmählich und unter Nutzung verschiedener, zunächst fossiler und nicht-fossiler sowie später mehr und mehr regenerativer Primärenergieträger realisieren lassen. Der Einsatz fossiler Primärenergieträger verlangt zunehmend die CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung in geologischen Formationen. Der Umfang der Nutzung von Wasserstoff und seine Erzeugung aus regenerativen Quellen wird in dem Maß zunehmen, wie sich die heute dominierende Stellung fossiler Energieträger am Markt verringern und effiziente sowie umweltgerechte Energieumwandlungssysteme wie Brennstoffzellensysteme an Bedeutung gewinnen werden. Letztlich wird die Markteinführung von Wasserstoff, der in Konkurrenz zu anderen Lösungs-

ansätzen steht, auch von politischen Maßnahmen wie der Umweltgesetzgebung und Markteinführungsprogrammen, aber auch von der weltweiten Energiepreisentwicklung abhängen.

### **Brennstoffzellen: Technische Vielfalt – vielfältige Einsatzgebiete**

In einer Brennstoffzelle wird der Energieinhalt des Brennstoffs in elektrische Energie umgewandelt. Das chemische Prinzip der Brennstoffzelle basiert im Gegensatz zum Motor auf der „kalten“ Verbrennung. Dadurch werden die hohen Abwärmeverluste des Motors vermieden. Das Prinzip wurde bereits in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entdeckt, fand aber erst nach dem Zweiten Weltkrieg Eingang in technische Entwicklungen. Ein wichtiges Einsatzgebiet war zunächst die Raumfahrt, wo ein derart unabhängiges System für die Gewinnung von Strom (und gleichzeitig von reinem Wasser) große Vorteile besaß.

Die Leistungsfähigkeit einer Brennstoffzelle lässt sich an zwei Größen festmachen: der Gesamtleistung sowie dem Wirkungsgrad. Der Wirkungsgrad bezeichnet das Verhältnis zwischen der Energie, die in Form von Brennstoffen eingesetzt worden ist, und der am Ende des Brennstoffzellenprozesses nutzbaren Energie. Der elektrische Wirkungsgrad steht dabei für die nutzbare elektrische Energie, der Gesamtwirkungsgrad hingegen für die genutzte Gesamtenergie aus Strom und Wärme. Da in den meisten Brennstoffzellensystemen beide Energieformen gleichzeitig nutzbar sind, kann der Gesamtwirkungsgrad wie bei anderen Techniken, bei denen eine Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) stattfindet, bis zu 90 Prozent betragen. Die elektrischen Wirkungsgrade von Brennstoffzellen bewegen sich je nach Typ und Leistungsgröße zwischen 30 und 55 Prozent. Wenn in späteren Entwicklungsschritten Hochtemperatur-Brennstoffzellen mit Gasturbinen kombiniert werden, könnten sogar elektrische Wirkungsgrade von bis zu 70 Prozent erreicht werden. Das Spektrum der möglichen Leistung reicht von wenigen Watt, wie sie beispielsweise zur Versorgung portabler elektrischer Geräte benötigt werden, über alle Zwischenbereiche bis hin zu Kraftwerken mit einigen 100 Kilowatt Leistung. Angestrebt werden Leistungen bis zu mehreren Megawatt.

### **Wasserstoff**

Wasserstoff steht im Periodensystem der chemischen Elemente an erster Stelle. Er ist in gebundenem Zustand als Wasser und in organischen Verbindungen weit verbreitet. Technische Bedeutung hat Wasserstoff für Hydrierungen (Fetthärtung), Reduktionsprozesse und Synthesen (Ammoniak, Methanol, Gas to Liquids).

Wasserstoff als Energieträger ist ein Baustein unserer Technik seit einer Zeit, in der das „Wassergas“, historische Bezeichnung für ein Gasgemisch mit etwa 50 Vol. % Wasserstoff, aus festen Brennstoffen erzeugt wurde. Auch im Stadtgas – u. a. auf der Basis von Kokereigas – diente Wasserstoff in einem Gasgemisch zu Leucht- und Heizzwecken. Die Einführung von Erdgas mit 80–90 Vol. % Methan beendete die Ära der wasserstoffreichen Gasgemische auf dem Energiemarkt, wobei Erdgasreformierung ebenso wie Kohlevergasung bei Erzeugung eines wasserstoffreichen Synthesegases für viele Syntheseanwendungen bis hin zum Kombi-Kraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung und Wasserstoffnutzung erhebliche Potenziale für den Energiemarkt darstellen.

Durch den Einsatz von Energie lässt sich Wasserstoff in isolierter Form darstellen und wird dadurch zu einem Energieträger, dessen chemisch gespeicherte Energie nutzbar gemacht werden kann. Die Zielsetzung, Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser durch den Prozess der Elektrolyse auf der Basis regenerativer Elektrizität zu erzeugen, bildet heute die Grundlage für eine weltweite Wasserstofftechnik von morgen in Verbindung mit der Brennstoffzellentechnik.

Die Wasserstoffenergie-technik ersetzt die Oxidation fossiler Energieträger durch die Reaktion

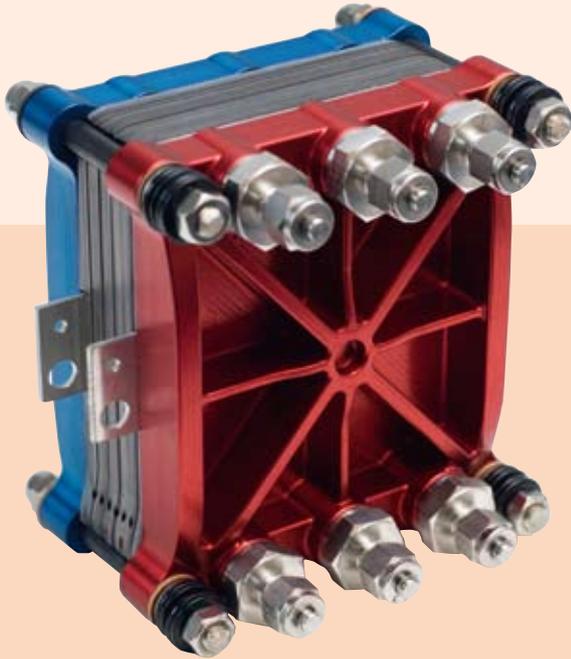


Beim Vergleich des Umgangs von Wasserstoff mit Methan oder Benzin fallen insbesondere die folgenden Eigenschaften auf:

- ▶ hoher gravimetrischer Heizwert bei niedrigem volumetrischen Heizwert
- ▶ weite Zündgrenzen in Luft
- ▶ hohe Verbrennungsgeschwindigkeit in Luft
- ▶ hohe Diffusionsgeschwindigkeit
- ▶ niedrige Zündenergie
- ▶ niedriger Siedepunkt (–253 °C)
- ▶ emissionsarme Verbrennung (CO<sub>2</sub>-frei)

Kosten und Umweltverträglichkeit einer solchen Technik hängen davon ab, welche Primärenergie zur Stromerzeugung für die Elektrolyse – als Substitution heutiger fossil-basierter großtechnischer Verfahren wie Erdgas-/Wasserdampf-Reformierung – eingesetzt wird, welche Energieumwandlungstechniken für die Wasserstoffnutzung bevorzugt werden, in welchem Umfang logistische Voraussetzungen für die Wasserstoffbereitstellung zu erfüllen sind und welcher Stellenwert den verschiedenen Kriterien in der Ökobilanz und damit auch der Internalisierung der externen Kosten beigemessen wird.





Wenn viele einzelne Brennstoffzellen zu einem Stapel – einem so genannten Stack – zusammengefügt werden, addiert sich die Leistung der einzelnen Zellen.

Es gibt verschiedene Typen von Brennstoffzellen, die sich in ihrem Aufbau, den Werkstoffen und den chemischen Reaktionen erheblich unterscheiden. Das Grundprinzip ist aber stets gleich: Zwei Elektroden (Anode und Kathode) werden durch einen Ionenleiter, den Elektrolyt, getrennt, der ausschließlich geladene Teilchen passieren lässt. Auf diese Weise werden zwei Reaktionsräume voneinander getrennt, in denen unterschiedliche chemische Prozesse (Oxidation und Reduktion) ablaufen, die gemeinsam zum Fluss eines elektrischen Stroms führen. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal für die verschiedenen Brennstoffzellentypen ist der Elektrolyt, der die beiden Reaktionsräume voneinander trennt, aber in allen Fällen eine selektive Diffusion bestimmter Ionen ermöglicht. Als Elektrolyt dient in der Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM) eine protonenleitende Membran; je nach Brennstoffzellentyp gibt es jedoch auch Elektrolyte aus flüssiger Kalilauge, geschmolzenen Karbonaten oder aus festen Keramikmaterialien. Vom Elektrolyt hängen nicht nur die Art der ausgetauschten Ionen ab, sondern auch die Arbeitstemperaturen. Diese können zwischen 60 und 1000 Grad Celsius liegen.

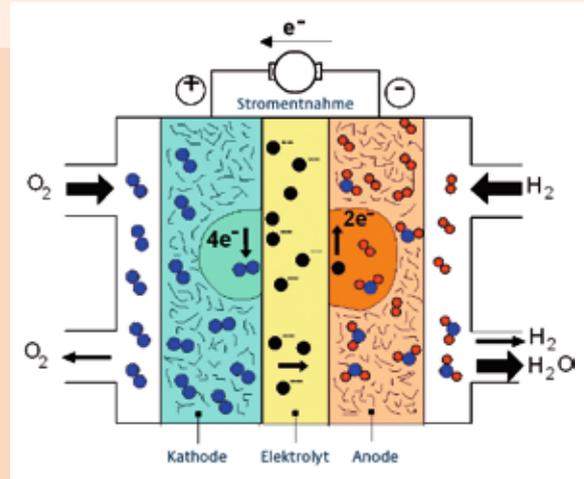
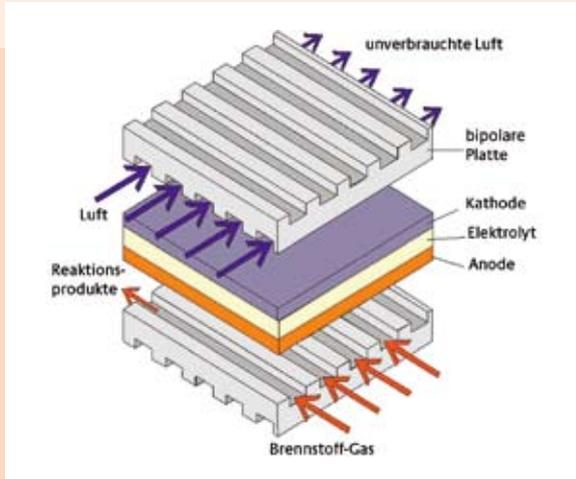
Eine PEM-Brennstoffzelle baut sich im Detail folgendermaßen auf. Umfasst wird sie durch so genannte Bipolarplatten. Diese bestehen aus Graphit, Metall oder Kunststoffen, die mit Hilfe von Carbon-Nanoröhrchen elektrisch leitend gemacht worden sind; diese Platten besitzen ein ausgefeiltes System von

feinsten Kanälen, durch das die Gase strömen und gleichmäßig auf die Elektroden verteilt werden. Bei den Gasen handelt es sich um Wasserstoff als Brennstoff und Luft als Oxidationsmittel. Als Elektroden dienen dünne, poröse Papiere aus Kohlenstoff- oder Graphitfasern. Der Elektrolyt besteht aus einer Polymermembran mit der besonderen Eigenschaft, dass Wasserstoffionen durch sie hindurch aus dem einen in den anderen Reaktionsraum treten können. Die Membran ist beidseitig mit einem Katalysator-Material beschichtet (zum Beispiel Platin). Zusammen mit den zwei Elektroden bildet die Membran eine so genannte MEA (Membrane-Electrode-Assembly), die über Gasdiffusionsschichten mit den Bipolarplatten in Kontakt steht.

Aufgrund von chemischen Gesetzmäßigkeiten vermag jede einzelne PEM-Zelle – wie Batteriezellen – nur eine elektrische Spannung in der Größenordnung von einem Volt zu liefern. Für die meisten technischen Anwendungen reicht dies nicht aus. Will man höhere Spannungen erreichen, muss man viele Zellen miteinander koppeln und elektrisch in Serie schalten. Eine solche Kombination einzelner Zellen wird als Stack (englisch für Stapel) bezeichnet.

Bei der Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC) wird flüssiges Methanol als Brennstoff genutzt, dem meist Wasser zugesetzt ist. Wie bei der PEM dient auch in diesem Fall eine Membran als Elektrolyt. Solche methanolgetriebenen Systeme sind vor allem im Leistungsbereich zwischen wenigen Watt und einigen hundert Watt optimal einsetzbar, insbesondere für portable Anwendungen. Bei höheren Leistungen wirkt sich der schlechte Wirkungsgrad solcher Zellen negativ auf den Verbrauch aus. Der größte Vorteil dieser Technik besteht darin, dass flüssiges Methanol als Brennstoff wesentlich leichter handhabbar ist als Wasserstoff; eine Umwandlung (Reformierung) in Wasserstoff wird überflüssig. Ein Nachteil der DMFC besteht allerdings darin, dass das Methanol zu einem Teil durch heutige Membranen hindurch wandert. Dabei geht nicht nur Brennstoff verloren, sondern es sinkt auch die Spannung und damit die Leistung des Systems.

In der so genannten Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) besteht



Design und Prinzip einer planaren SOFC-Brennstoffzelle.

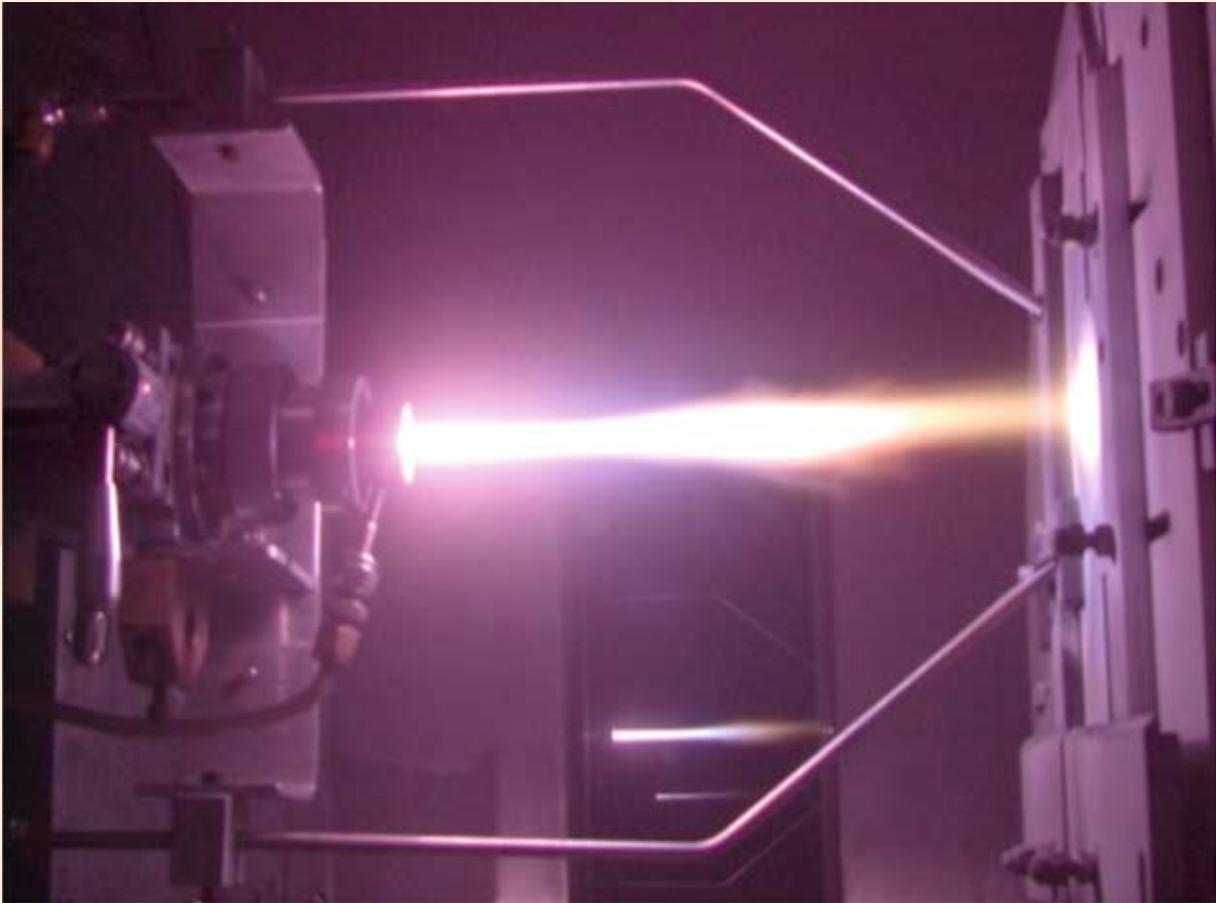
der Elektrolyt aus einer Schmelze aus Lithium- und Kaliumcarbonat. Als Brenngas auf der Anodenseite wird ein Gemisch aus Wasserstoff und Kohlendioxid benutzt, das durch einen Reformierungsprozess aus methanhaltigen Energieträgern wie Erdgas, Biogas oder Klärgas gewonnen wird. Auf der Kathodenseite wird eine Mischung aus Luft und Kohlendioxid eingesetzt. Damit die entsprechenden chemischen Prozesse ablaufen können, muss eine MCFC auf eine Betriebstemperatur von etwa 650 Grad Celsius gebracht werden. Die Elektroden bestehen in der Regel aus Nickel; teure Katalysatorbeschichtungen sind nicht notwendig, da bei der Betriebstemperatur die Reaktionen bereits hinreichend schnell ablaufen. Brennstoffzellenanlagen des Typs MCFC erreichen heute eine Leistung von rund 250 Kilowatt. Der maximale elektrische Wirkungsgrad einer Zelle liegt bei brutto 55 Prozent. Die gesamte Anlage erreicht einen elektrischen Nettowirkungsgrad von 46 Prozent.

Die Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) besitzt als Elektrolyt einen festen sauerstoffionenleitenden Keramikwerkstoff, zum Beispiel Zirkoniumoxid ( $ZrO_2$ ). Während die Anode aus einem keramisch-metallischen Werkstoff gefertigt wird, besteht die Kathode aus elektrisch leitfähiger Keramik. Die Betriebstemperatur solcher Brennstoffzellen liegt bei 700 bis 1000 Grad Celsius. In der SOFC wird als Brenngas in der Regel reiner Wasserstoff verwendet, als Kathodengas Luftsauerstoff (siehe Abbildung).

Da Brennstoffzellen mit reinem Wasserstoff arbeiten, der nur in seltenen Anwendungen vor Ort zur Verfügung steht, muss man ihnen einen so genannten Reformer vorschalten. Unter Reformierung versteht man Prozesse, in denen Kohlenwasserstoffe (Erdgas, Biogas, Ethanol, Methanol, Benzin) zu Wasserstoff umgesetzt werden. Der Reformierungsprozess verläuft in den meisten Fällen unvollständig. Hinter dem Reformer kann der Kohlenmonoxidgehalt noch bis zu 10 Prozent betragen, zusätzlich können höhere Kohlenwasserstoffe und Verunreinigungen im Reformiergas enthalten sein. Um die Brennstoffzellen nicht zu gefährden, müssen häufig noch mehrere aufwändige Reinigungsschritte integriert sein, die Kohlenmonoxid, höhere Kohlenwasserstoffe und Verunreinigungen entfernen.

Alle Typen von Brennstoffzellen sind sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Insbesondere greifen Schwefelanteile im Brennstoff das Material der Elektroden und Elektrolyten an und müssen daher sorgfältig entfernt werden.

Aufgrund ihrer großen Vielfalt in Leistung und Technologie können Brennstoffzellen heute und in Zukunft in verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen. Das BMWi hat in den letzten Jahren vor allem jene Bereiche gefördert, bei denen aus derzeitiger Sicht die größten Chancen auf eine rasche Umsetzung und Einführung in die jeweiligen Märkte bestehen. Dabei wurden folgende Schwerpunkte gesetzt:



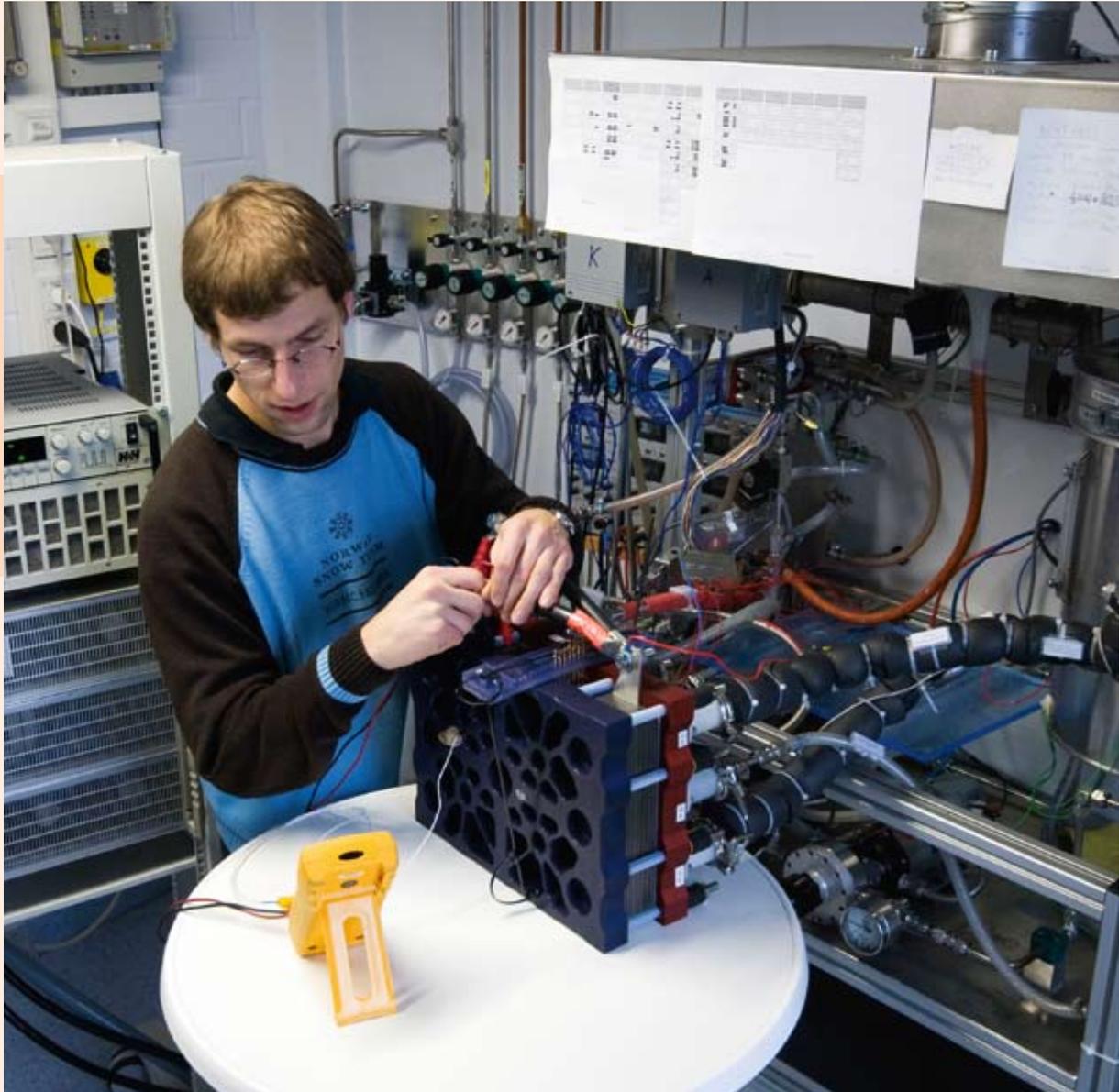
Beschichtung der Elektroden von SOFC-Brennstoffzellen mit dem Verfahren des Plasma-Spritzens.

- ▶ Einsatz der PEM bei der Energieversorgung von stationären (Häusern und Gebäuden) oder mobilen Anwendungen,
- ▶ Entwicklung von Anwendungen in der so genannten sekundären Energieversorgung (Auxiliary Power Units, APUs) von Fahrzeugen aller Art,
- ▶ Entwicklung von Hochtemperatur-Brennstoffzellen (MCFC und SOFC) für industrielle Kraft-Wärme-Kopplung.

#### Der Forschung über die Schulter geschaut

Derzeit wird eine Technologie erforscht, die man als Hochtemperatur-PEM (HT-PEM) bezeichnet. Die Betriebstemperatur dieser Brennstoffzellen liegt zwischen 100 und 200 Grad Celsius und damit deutlich höher als die Betriebstemperaturen „klassischer“ PEM-Brennstoffzellen. Dieses Konzept besitzt Vorteile sowohl gegenüber der herkömm-

lichen PEM als auch gegenüber Hochtemperatur-Anwendungen wie MCFC oder SOFC. „Ein solches System kann dynamischer betrieben werden, also schneller auf Betriebstemperatur gebracht oder wieder heruntergefahren werden als die Anlagen, die bei noch höheren Temperaturen arbeiten“, erklärt Dr. Bernd Emonts vom Institut für Energieforschung des Forschungszentrums Jülich. Positiv im Vergleich zur PEM wiegt die Tatsache, dass die HT-PEM weniger empfindlich gegenüber Kohlenmonoxid (CO) aus der Reformierung ist. Herkömmliche PEM vertragen Kohlenmonoxid nur in Konzentrationen von weniger als 0,005 Prozent. Die HT-Variante verträgt dagegen 200-mal mehr Kohlenmonoxid, also rund ein Prozent; es ist daher nur ein einziger Reinigungsschritt nach der Reformierung notwendig. Anwendungen für diese Technologie sieht Bernd Emonts im Leistungsbereich von fünf bis zu mehreren hundert Kilowatt – elektrischen Leistungen, wie sie etwa für die Bordstromversorgung in Flugzeugen, auf Booten oder in Lastkraftwagen benötigt werden.



Brennstoffzellenforschung am ZSW in Ulm.

Forschungsarbeiten leistet das Jülicher Institut auch für die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC). In Zusammenarbeit mit verschiedenen Industriepartnern werden in BMWi geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Komponenten wie z.B. Membranen entwickelt bzw. praktische Anwendungen wie der DMFC-Einsatz in Flurförderfahrzeugen optimiert.

„Wir als Forschungsinstitut entwickeln Basistechnologien und zeigen auf, dass sie als System funktionstüchtig sind“, betont Emonts. „Die eigentliche Anwendung wird dann bei den industriellen Kunden selbst entwickelt“, so beschreibt der Forscher die Arbeitsteilung zwischen Wissenschaft und Industrie.

### Die Komponenten werden optimiert

An der Optimierung der klassischen PEM-Brennstoffzelle arbeitet auch das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) in Ulm. „Manchmal fragen uns die Leute: Wann ist die Brennstoffzelle denn endlich marktreif?“, berichtet ZSW-Vorstand Professor Werner Tillmetz. „Meine Antwort darauf lautet: Die PEM funktioniert, und es gibt bereits kommerzielle Produkte auf dem Markt.“ Dennoch gibt es noch ein großes Verbesserungspotenzial: „Eine solche Anlage muss unter allen Alltagsbedingungen zuverlässig funktionieren und dabei eine akzeptable Lebensdauer erreichen“, so die Zielvorgabe. Eine Brennstoffzelle in einem Auto soll auch an einem kalten Wintermorgen problemlos starten



Um die Vereinheitlichung von unterschiedlichen Brennstoffzellen-Komponenten zu erreichen, bedarf es umfangreicher Entwicklungsanstrengungen.

und mindestens zehn Jahre lang halten. Weitere wichtige Entwicklungsziele sieht Tillmetz in einer zuverlässigen Fertigung und einer konsequenten Kostenreduktion. Dabei spielen neuartige Materialien eine entscheidende Rolle; diese sollen gleichzeitig dazu beitragen, die Leistung, die pro Flächeneinheit einer Zelle gewonnen werden kann, weiter zu steigern.

Ein zentraler Ansatzpunkt sind die Elektroden in einer Zelle. In einer PEM muss einerseits Wasserstoff (Anode), andererseits Luft (Kathode) durch das Material hindurch diffundieren. Dazu dient ein ausgeklügeltes System feiner Poren, die für eine gleichmäßige Verteilung der Gase sorgen. Die Elektroden sind jeweils mit katalytisch wirkenden Substanzen beschichtet, welche die erwünschten chemischen Reaktionen beschleunigt ablaufen lassen. Gleichzeitig benötigt dieser Brennstoffzellentypus ein ausgefeiltes Wassermanagement: Die Zuluft soll befeuchtet werden, gleichzeitig muss mit der Abluft das erzeugte Wasser abgeführt werden. Eine PEM reagiert sehr empfindlich, wenn sie trockenläuft, also nicht genügend Wasser vorhanden ist. Dann beschleunigen sich die Alterungsprozesse, und die Lebensdauer sinkt rapide. Andererseits kann eine Zelle bei Wasserüberschuss regelrecht „absterben“ – ähnlich wie ein Verbrennungsmotor bei zu viel Kraftstoff.

Die Bipolarplatten sind Bauteile mit einer sehr feinen Kanalstruktur. Die eingefrästen oder geprägten Kanäle sollen eine bestmögliche Verteilung der Gase gewährleisten. Zur Verbesserung der Geometrie der Kanäle werden mathematische Verfahren aus der Strömungsdynamik (Computational Fluid Dynamics) eingesetzt. Ziel ist es, sowohl Wasserstoff als auch Luft so gleichmäßig wie möglich auf den Reaktionsflächen einer Zelle zu verteilen und sie so optimal auszunutzen. Gleichzeitig soll auch der Strömungswiderstand möglichst verringert werden: Die Luft auf der Kathodenseite muss mit einem Gebläse in die Zelle gepumpt werden, um den hohen Widerstand zu überwinden. Dies bedeutet einen Verlust der von der Brennstoffzelle erzeugten nutzbaren Leistung, denn die Gebläse gehören zu den größten Nebenverbrauchern in einem solchen System.

Ein weiteres Hauptthema der Forschungsarbeiten sind die Katalysatoren. Bislang wird auf der Kathodenseite dazu beispielsweise Platin eingesetzt. Dieses Metall ist verhältnismäßig teuer, die Preise auf dem Weltmarkt schwanken zudem oft unvorhersehbar. Unter bestimmten Bedingungen können am Katalysatormaterial Korrosions- oder regelrechte Vergiftungserscheinungen auftreten. Wunschziel der Techniker ist es daher, das Platin komplett zu ersetzen. Zunächst kommen hier Edelmetalllegierungen

in Frage – langfristig vielleicht auch edelmetallfreie Katalysatoren.

Eine Herausforderung für Forschung und Entwicklung bilden die Dichtungssysteme, mit deren Hilfe in jeder einzelnen Zelle Elektrodenräume und Kühlung voneinander separiert werden. Innerhalb eines Stacks aus mehreren hundert Einzelzellen kommen erhebliche Flächen zusammen, auf denen unterschiedliche Medien (Wasserstoff, Luft, Kühlwasser) gegeneinander abgedichtet werden müssen. Für diese Dichtungen wird in der Regel ein Silikon-Kautschuk verwendet; bei diesem Material treten aber Probleme bei der Haltbarkeit auf. Daher sucht die Forschung derzeit nach Alternativen, etwa in Form von Epoxid-Harzen.

Neben der Verbesserung der einzelnen Komponenten von PEM-Brennstoffzellen bestehen weitere Aufgaben darin, die einzelnen Systemkomponenten möglichst kompakt zu gestalten und zu einem funktionstüchtigen Gesamtsystem zu integrieren. Dazu gehören der eigentliche Zellstapel sowie alle Zusatzgeräte wie Luftgebläse, Ventile oder Wärmetauscher. Am ZSW ist in den letzten Jahren ein Demonstrationsgerät entstanden, das intern den Spitznamen „Ulmer Stromschachtel“ erhalten hat. Das Gerät ist ein Hybrid aus Brennstoffzelle und passender Batterie; es kann kontinuierlich eine Leistung zwischen 500 und 1000 Watt, kurzzeitig aber auch eine Spitzenlast von drei bis vier Kilowatt erzeugen. Das System ist komplett integriert, so dass es sozusagen als „Plug and Play“ einsetzbar ist: „Vorne geht Wasserstoff hinein, hinten kommt Wechselstrom heraus.“ Das ZSW testet den Einsatz derzeit mit einem Kooperationspartner aus dem Yachtbau. Zusammen mit einem Industriepartner und mit Unterstützung durch das BMWi wird ein kompaktes 2-Kilowatt-PEM-Modul entwickelt.

Im Auftrag des BMWi begleitet das ZSW darüber hinaus ein so genanntes Kleingeräte-Programm. Ziel ist es, Hilfestellung bei der Vereinheitlichung von verschiedenen Komponenten zu leisten. „Ein Schlüsselproblem bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen besteht darin, dass es kaum voll taugliche Systemkomponenten wie Pumpen, Ventile oder Gebläse gibt“, erklärt Professor Tillmetz. „Die Bauteile, die man bei Zulieferern kauft,

passen oft nicht.“ Kleinere Unternehmen verfügen in der Regel nicht über die Mittel, um solche Komponenten zielgerichtet für ihre Systementwicklung anpassen zu können. Das BMWi unterstützt die Adaptionsentwicklung in Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

### Strom und Wärme im Haus

Eines der wichtigsten zukünftigen Einsatzgebiete für Brennstoffzellen ist die Energieversorgung von Gebäuden, die sogenannte Hausenergieversorgung. Denn Brennstoffzellen stellen sowohl Strom als auch Wärme zur Verfügung und eignen sich daher hervorragend als Energiezentrale in Ein- oder Mehrfamilienhäusern sowie in kleinen Gewerbebetrieben. Im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) können Brennstoffzellen als dezentrale Energiemodule mit angepasstem Leistungsangebot eine herausragende Rolle spielen.

In der Hausenergieversorgung dominiert die PEM-Technologie. In Deutschland entwickelt derzeit eine Reihe von Unternehmen im Rahmen BMWi-geförderter Projekte entsprechende Geräte, darunter die Firmen Baxi Innotech und Viessmann. Die elektrische Leistung liegt zwischen 1 Kilowatt und rund 5 Kilowatt. Die angestrebten Zielwerte für den elektrischen Wirkungsgrad der Systeme betragen 30 bis 35 Prozent, der Gesamtwirkungsgrad (Strom plus Wärme) dürfte fast 90 Prozent erreichen. Damit werden die immer knapper werdenden fossilen Energiequellen optimal genutzt. Solche Geräte besitzen Abmessungen, die herkömmlichen Heizanlagen entsprechen. Im Alltagseinsatz werden sie an die öffentliche Gas- und Stromversorgung angeschlossen. Überschüssige elektrische Energie, die nicht sofort im Gebäude selbst verbraucht wird, kann ins Netz eingespeist werden. Ein nachgeschalteter konventioneller Heizkessel für Spitzenlasten sorgt für ausreichende Wärme auch an winterkalten Tagen; ein entsprechendes Speichersystem kann dabei helfen, den über den Tagesverlauf schwankenden Wärmebedarf auszugleichen. Dass Brennstoffzellen auch sehr gut und mit hohem Wirkungsgrad bei Teillast – das heißt bei geringerer Leistung als maximal möglich – betrieben werden können, kommt ihrem Einsatz in der Hausenergieversorgung zugute, wo der Strom-



Ein Brennstoffzellenaggregat zur Energieversorgung (Strom und Wärme) in Gebäuden.

und Wärmebedarf in der Regel im Tagesverlauf schwankt.

Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird auf diesem Sektor derzeit an allen Komponenten geleistet, die zu einem alltagstauglichen Hausenergiesystem gehören. Dies beginnt bei der Reformierung von Brennstoffen wie Erdgas und reicht über die Reinigungstechnik bis hin zur Regelung und zur Stromwandlung (von Gleich- auf Wechselstrom).

Im Rahmen eines seit 2000 laufenden Projekts, das vom BMWi gefördert wird, arbeitet das Unternehmen Viessmann gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie an der Entwicklung einer Energiezentrale für Einfamilienhäuser auf PEM-Basis, die über eine elektrische Leistung von zwei Kilowatt verfügt. Ihre Wärmeleistung (Abwärme aus der Brennstoffzelle sowie aus der Gasaufbereitung) liegt bei 3,5 Kilowatt. Der elektrische Wirkungsgrad soll bei mehr als 30 Prozent liegen, der Gesamtwirkungsgrad bei fast 90 Prozent. 2006 wurden erste Versuchsanlagen in Betrieb genommen, Feldversuche werden bald folgen. Mit einer Markteinführung rechnet das Unternehmen ab dem Jahr 2010.

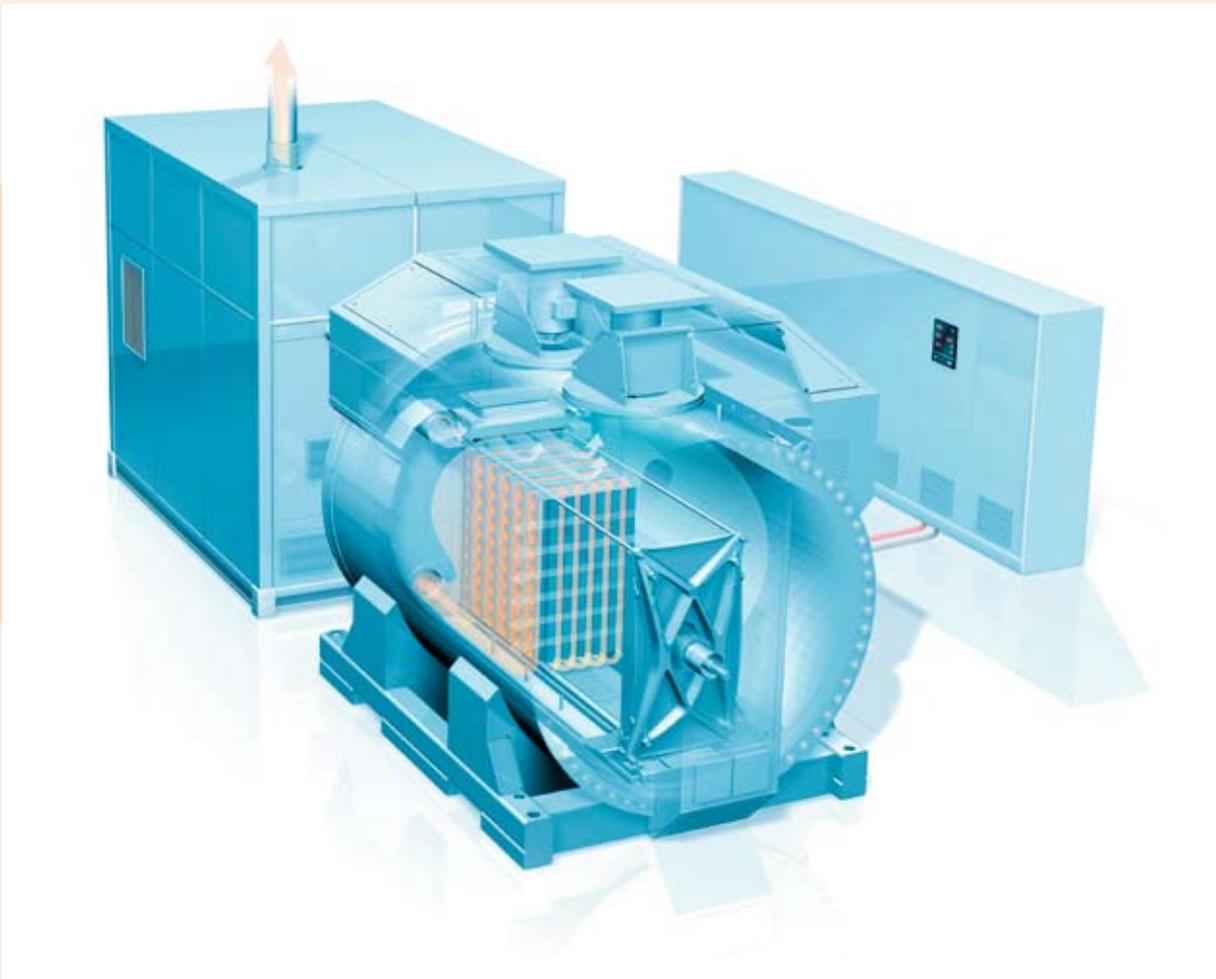
Es gibt auch Ansätze für den Einsatz der SOFC-Technologie in der Hausenergieversorgung. So kooperiert die Firma Vaillant derzeit mit dem Autzulieferer Webasto, der sich seit einigen Jahren mit Brennstoffzellensystemen beschäftigt, die an Bord

von Fahrzeugen aus Benzin oder Diesel elektrischen Strom erzeugen. Solche Module sollen nun an den Betrieb mit Erdgas angepasst und in kleineren Brennstoffzellenheizgeräten eingesetzt werden. Das Projekt wird aus Mitteln des BMWi unterstützt.

### Die Brennstoffzelle als Kraftwerk

Was haben das Abwasserwerk in Stuttgart, die Universitätsklinik Magdeburg, die Kläranlage im bayerischen Moosburg und das Münchener Datenzentrum der DeTeImmobilien GmbH gemeinsam? Die Antwort lautet: Brennstoffzellen. Genauer gesagt findet man in diesen Einrichtungen einen bestimmten Typus dieser Technologie, den man als Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) bezeichnet. Diese Energiewandler erzeugen sowohl Strom als auch Wärme, die zu unterschiedlichen Zwecken nutzbar sind. Die entsprechenden Kraftwerke werden von dem Unternehmen MTU ONSITE ENERGY im Münchener Stadtteil Ottobrunn hergestellt. Viele dieser Prototypen-Anlagen wurden mit Hilfe von Fördermitteln aus dem Zukunftsinvestitionsprogramm (ZIP) der Bundesregierung gebaut und in Betrieb genommen.

Wenn man die Produktionshallen von MTU ONSITE ENERGY betritt, fallen sofort die silbermetallischen Stahlkessel auf, fast drei Meter im Querschnitt messend, die jeweils das zentrale Brennstoffzellen-Modul einschließen. Der Kessel enthält einen Stapel aus insgesamt 350 MCFC-Zellen. Der Kessel enthält außerdem eine Mischkammer für die verschiedenen Gase, die zu- und abgeführt werden, ein Umwälzgebläse sowie ein Heizsystem, das die ganze Apparatur auf die Betriebstemperatur von 650 Grad Celsius bringt. „Dieses Anheizen muss besonders schonend erfolgen, um Wärme-Spannungen in den Bauteilen zu vermeiden“, erklärt Dr. Manfred Bischoff, Technologie-Manager bei MTU ONSITE ENERGY; der Vorgang kann daher unter Versuchsbedingungen mehrere Tage in Anspruch nehmen. Das Zell-Modul wird ergänzt durch eine separate Gasaufbereitungsanlage, in der das Brenngas entschwefelt, erhitzt und befeuchtet wird. Ein unscheinbar aussehender Schaltkasten schließlich enthält die Anlagensteuerung; hier erfolgt auch die Umwandlung des Gleichstroms, der aus der Brennstoffzelle kommt, in netzkonformen Wechselstrom.



Aufbau einer MCFC-Brennstoffzellenanlage des Typs „Hot Module“

„Das Brennstoffzellen-Modul und die Nebengregate sind sozusagen wie Motor und Fahrzeug“, so Bischoff. Ein solches „Hot-Module“ besitzt eine elektrische Leistung von 250 Kilowatt, stellt aber nicht nur Strom, sondern gleichzeitig auch 180 Kilowatt Wärme mit einer Temperatur von bis zu 400 Grad Celsius bereit. Diese wird beispielsweise von industriellen Kunden als Prozesswärme im Produktionsprozess genutzt. In dem Münchener Telekommunikationsunternehmen DeTeImmobilien wird die Wärme dagegen in Kälte umgewandelt und dient der Raumklimatisierung. „Wenn man den Strom und die Wärme nutzt, die eine solche Brennstoffzelle liefert, dann erreicht man einen Gesamtwirkungsgrad von über 80 Prozent“, berichtet Manfred Bischoff.

Gespeist werden kann eine solche Anlage sowohl mit herkömmlichem Erdgas als auch mit Gasen, wie sie in Biomasse- und Kläranlagen oder in Deponien anfallen. „Diese enthalten etwa 40 bis 50 Prozent Methan, den Rest bilden Stickstoff und Kohlendioxid“,

berichtet Bischoff: „Die MCFC-Technologie kann jedoch gerade solche so genannten Niedrig-Energie-Gase sehr wirkungsvoll verstromen.“ Ein besonderer Vorteil der MCFC-Technologie besteht darin, dass die Brenngase nach einer Abtrennung von Schwefel und höheren Kohlenwasserstoffen intern in Wasserstoff umgewandelt werden können. Das wirkt sich auf den Aufbau der Anlage aus. Der Reformer befindet sich nicht – wie bei PEM – vor der eigentlichen Brennstoffzelle, sondern im gleichen Gehäuse wie der Brennstoffzellenstapel. Aufgrund des hohen Wirkungsgrades kann eine MCFC mit der gleichen Menge Brenngas 30 Prozent mehr elektrische Energie erzeugen als ein konventionelles Kraftwerk gleicher Leistung oder ein Verbrennungsmotor.

MTU ONSITE ENERGY hat inzwischen 20 Anlagen dieses Typs gebaut, die nun an verschiedenen Einsatzorten ihre Leistung erbringen. Es handelt sich durchweg um Versuchsanlagen, deren Bau und Aufstellung erst durch eine öffentliche Förderung ermöglicht worden ist. In der Universitätsklinik Magdeburg hat



Beim „Hot Module“ ist es den Konstrukteuren gelungen, alle heißen Teile in ein gemeinsames Gehäuse zu integrieren. Dadurch werden nicht nur Teile der Peripherie überflüssig, auch der Wirkungsgrad setzt neue Maßstäbe. Ohne Flamme und ohne bewegte Massen wie rotierende Turbinenschaufeln oder eine Kolbenbewegung setzt das Hot Module die Energie des Gases direkt in Strom und Wärme um.

ein solches Hot-Module inzwischen 30.000 Betriebsstunden hinter sich gebracht. „Unser Zielwert liegt bei 40.000 Stunden“, so Bischoff: „Wir sind also schon nahe daran nachzuweisen, dass diese Kraftwerke eine konkurrenzfähige Lebensdauer besitzen.“ Dagegen „hapert es noch bei den Kosten“, schränkt der Manager ein. Vor allem könne man die notwendigen Materialien noch nicht in entsprechend großen Mengen einkaufen. Darüber hinaus seien derzeit noch Sicherheitselemente eingebaut, die eine solche Anlage teurer machen als notwendig. „Hier setzen wir inzwischen mit einem entsprechenden value engineering an“, betont Bischoff, „damit wir die Kosten immer näher an Marktpreise heranführen.“

Während MTU ONSITE ENERGY lange Zeit die eigentlichen Brennstoffzellen von dem amerikanischen Partner FCE bezogen hat, ist das Unternehmen vor einigen Jahren auch aktiv in die Zell-Entwicklung und -Fertigung eingestiegen. Unter dem Stichwort „Euro-Zelle“ und gefördert vom BMWi steht diese Eigenentwicklung inzwischen an der Schwelle zur Einführung: Eine erste Anlage mit diesem Herzstück wurde an einen Kunden ausgeliefert und hat inzwischen 6.000 Betriebsstunden in der Testphase absolviert.

Für die Euro-Zellen werden neue, kostengünstigere Materialien eingesetzt und die Fertigungspro-

zesse umgestellt. So hat man die Prozesstemperaturen senken können und fertigt damit nicht nur umweltfreundlicher, sondern auch billiger. Gleichzeitig soll mehr Strom mit einem Zellstapel erzeugt werden. Verwendet werden nun zum Beispiel neue Metallhalbzeuge, die insbesondere im Kern der Zelle, etwa für die Stromkollektoren, vorteilhaft sind; solche Werkstoffe nutzt man im Übrigen auch in der Batterieherstellung.

Der Zukunftstrend geht nach Bischoffs Auffassung eindeutig in Richtung größerer, leistungsfähigerer Anlagen: „Die Kunden wünschen Kraftwerke mit Leistungen im Megawattbereich“. Während die Brennstoffzellstapel bislang maximal 350 Zellen beinhalten, will man diese Stacks schrittweise auf 600 Zellen erweitern. Ein solcher Stack liefert dann eine Leistung von rund einem halben Megawatt. „Das System wird so aussehen, dass wir zwei solche Stapel zu einem Kraftwerk integrieren.“

Die Zahl der Zellen innerhalb eines Stacks kann dagegen nicht beliebig erhöht werden. „Es treten dann zunehmend thermomechanische Effekte auf, weil sich die Werkstoffe beim Hochheizen auf die Betriebstemperatur von 650 Grad Celsius unterschiedlich stark ausdehnen“, erklärt Bischoff. Solche Effekte sind umso deutlicher, je mehr Zellen man



Schmelzkarbonat-Brennstoffzellen wie das „Hot Module“ erzeugen sowohl Strom als auch Wärme.

übereinander stapelt. Sie lassen sich zudem nur schwer vorausberechnen, so dass jeweils umfangreiche Tests notwendig sind.

Einen weiteren Einsatzbereich für die MCFC-Anlagen sieht Bischoff in Zukunft beispielsweise auch in Gärtnereien, wo neben dem Strom und der Wärme gleichzeitig das (aus der Reformierung des Erdgases anfallende) Kohlendioxid in den Gewächshäusern wachstumsfördernd genutzt werden kann.

### Im portablen und mobilen Einsatz

Im Bereich der portablen Anwendungen ist die Entwicklung von Brennstoffzellen schon am weitesten

fortgeschritten: Die ersten Produkte sind bereits auf dem Markt, und in absehbarer Zeit werden Brennstoffzellen als Ersatz für Akkus nach Schätzungen von Experten einen nennenswerten Marktanteil erreichen. Im Bereich kleiner Leistungen (einige hundert Watt) scheint sich die DMFC durchzusetzen. Mögliche Anwendungen reichen hier von der Versorgung portabler elektronischer Geräte (zum Beispiel Laptops) über kleine Fahrzeuge (Roller, Gabelstapler) bis hin zur Bordstromversorgung von Fahrzeugen. Spitzenreiter in diesem Bereich ist derzeit die Firma SmartFuelCell (SFC), der es im Rahmen eines BMWi-Forschungs- und Entwicklungsvorhabens gelungen ist, die spezifischen Kosten der Brennstoffzelle deutlich zu reduzieren sowie die spezifische Energiedichte zu erhöhen. Das Ergebnis: Die Geräte wurden

kleiner und billiger. Die Produkte des Unternehmens können in Wohnmobilen, Sportbooten oder Rollern ebenso zum Einsatz kommen wie in Wetterstationen.

Durch eine Tankpatrone mit zehn Litern Methanol wird der Energiebedarf eines Reisemobils für rund zwei Wochen gedeckt. Mit dem Flüssiggas Propan wird dagegen die Brennstoffzelle betrieben, die derzeit das Münchener Unternehmen Truma entwickelt und ab 2008 in einer Kleinserie produziert. Das Gerät besitzt eine Leistung von maximal 250 Watt und ist ebenfalls für den Einsatz in Caravans und Wohnmobilen gedacht.

Das Feld, das die Brennstoffzellentechnologie seit vielen Jahren besonders stark antreibt, ist der Automobilsektor. Zwei Drittel aller Brennstoffzellenanwendungen werden in diesem Bereich stattfinden, so schätzen Fachleute. Zahlreiche Fahrzeughersteller entwickeln und testen seit vielen Jahren Antriebssysteme für Pkw auf Basis von Brennstoffzellen. In Deutschland sind insbesondere Daimler, Volkswagen, Opel und Ford auf diesem Gebiet aktiv. Die entsprechenden Testfahrzeuge haben inzwischen viele Millionen Kilometer zurückgelegt. Erste kommerzielle Angebote für Privatleute gibt es bereits – allerdings noch zu nicht konkurrenzfähigen Preisen. Kommerzielle Pkw mit einer Brennstoffzelle als Hauptantrieb werden nach Schätzung von Fachleuten regulär erst gegen Ende des nächsten Jahrzehnts auf den Markt kommen. Die Forschung und Entwicklung auf diesem Sektor wurde bisher überwiegend von den Automobilherstellern selbst und ohne öffentliche Förderung betrieben.

In den letzten Jahren haben die Entwickler unter anderem das Kaltstartverhalten der Brennstoffzellen verbessert und die ersten Systeme vorgestellt, die sich auch bei Minustemperaturen hochfahren lassen. Andere Verbesserungen betrafen die Leistungsdichte, so dass die Brennstoffzellen jetzt deutlich mehr Leistung pro Volumeneinheit liefern können.

Brennstoffzellen können nicht nur in Pkw, sondern auch in größeren Fahrzeugen eingesetzt werden. So hat im September 2006 das Ostseebad Barth einen Brennstoffzellenbus erhalten. Das Projekt, das in der Startphase auch aus dem Zukunftsinvestitionsprogramm (ZIP) der Bundesregierung unterstützt



Eine Benzin- und Diesel-Brennstoffzelle (SOFC) zur Stromerzeugung für das Bordnetz eines Pkw.

worden war, ist sozusagen der zu klein geratenen Kläranlage von Barth zu verdanken: Ihre Kapazität reichte während der Sommermonate nicht aus, da viele Touristen in den Ort kommen. Die Lösung: Man gab zusätzlichen Sauerstoff in das Belebungsbecken, um die Leistung der Anlage zu erhöhen. Reiner Sauerstoff kann am günstigsten per Elektrolyse durch Zerlegung von Wasser erzeugt werden, wobei außerdem Wasserstoff anfällt. Dieser Wasserstoff aus der Kläranlage wird nun für den Bus genutzt.

Es handelt sich um ein Hybridfahrzeug, das neben dem Brennstoffzellensystem über eine Batterie zur Rückgewinnung von Bremsenergie verfügt. Der Kraftstoff wird gasförmig in zwei jeweils 320 Liter fassenden Tanks bei 200 bar gespeichert. Das Fahrzeug erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 70 Kilometern pro Stunde und hat eine Reichweite von 180 Kilometern. Insgesamt können 22 Passagiere befördert werden. Weitere Busse mit Brennstoffzellenantrieb werden zum Beispiel in Hamburg betrieben. Ihr Betrieb ist ein Teil des EU-Projektes Clean Urban Transport for Europe (CUTE). In dem Projekt wurden insgesamt 27 mit Brennstoffzellen betriebene Busse in neun europäischen Städten erprobt. Die Brennstoffzellen-Busse auf der Basis von Citaro wurden von der Firma Daimler entwickelt. Das BMWi beteiligte sich



An vielen Orten in Deutschland ist das Busfahren mit Brennstoffzellenantrieb schon möglich.

an dem Vorhaben durch Kofinanzierung von zwei Wasserstoff-Tankstellen.

Im Clean Energy Partnership Projekt (CEP) in Berlin betreiben die führenden Technologie-, Mineralöl- und Energiekonzerne sowie eine Mehrzahl der deutschen Automobilhersteller eine Flotte von Autos mit Wasserstoffantrieb inklusive einer Wasserstoff-Tankstelle. Die Mehrzahl der Fahrzeuge verfügt über einen Brennstoffzellenantrieb, doch wird auch der Verbrennungsmotor mit Wasserstoff demonstriert. In der zweiten Phase wird die Zahl der getesteten Fahrzeuge in diesem Projekt noch einmal deutlich erhöht.

Ab dem Jahr 2012 rechnen Experten mit dem Ersteinsatz von Brennstoffzellen für die so genannte sekundäre Energieversorgung (Auxiliary Power Unit, APU). Dabei geht es nicht um den Antrieb für Pkw, Lkw oder Busse, sondern um intensiv energieverbrauchende Nebenaggregate wie Klimaanlage, Sitz- und Standheizung. Diese überfordern die Möglichkeiten des klassischen Systems aus Batterie und Lichtmaschine. Durch die Brennstoffzelle wird die Lichtmaschine quasi ersetzt.

Entwicklungsarbeiten für den Einsatz der SOFC-Technologie als APU laufen derzeit im Jülicher Institut für Energieforschung (IEF). Das Projekt mit dem Titel

ZeuS wird von einem industriellen Konsortium geleitet und mit finanzieller Unterstützung aus dem BMWi durchgeführt. „Eine solche Anwendung im Bereich Pkw stellt enorm hohe Anforderungen“, betont Dr. Robert Steinberger-Wilckens, Projektleiter Brennstoffzelle am IEF.

Es gilt, eine Menge Fragen zu klären: Wie hält die Brennstoffzelle die ständigen Vibrationen im Fahrbetrieb aus? Wie schnell kann sie starten? Nach welcher Anlaufzeit liefert sie ihre maximale Leistung? „Unser Ziel ist es, alle Komponenten in einer integrierten und kompakten Anlage zusammenzufassen, die robust gegen alle möglichen äußeren Einflüsse ist“, betont Steinberger. „Ein Auto fährt nun einmal über Schlaglöcher oder erzeugt Vibrationen: Dadurch darf die Brennstoffzelle keinen Schaden nehmen.“

Ein Ziel des ZeuS-Projektes ist es, für die mobilen Anwendungen Stacks in Leichtbauweise zu konstruieren. Als Material für die Bipolarplatten wird chromhaltiger Edelstahl eingesetzt. Die einzelnen Zellen werden durch entsprechende Verbindungsteile (Interkonnektoren) eingefasst und können dann zu einem Stack gestapelt werden. Die Interkonnektoren sind aus Metall gefertigt und so gestaltet, dass sie gleichzeitig als Zu- und Abführung für die Brennstoffe und Gase dienen. Alle internen Dichtungen bestehen



Blick unter die Motorhaube eines Brennstoffzellen-Pkw und dessen Wartung.



aus Glas oder Glaskeramik. In dem parallel laufenden Industrie-Verbundvorhaben ENSA wird zu dem SOFC-Stack eine entsprechende Peripherie entwickelt. Ein Gesamt-APU-System soll in einigen Jahren in Serie gehen. Es kann in Pkw, Lkw und Bussen eingesetzt werden. Durch diese neue Technologie entstehen große Marktchancen für die Automobilzulieferbetriebe, die sich der Entwicklung widmen.

#### **Das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie**

Die Unterstützung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien durch den Bund hat sich bisher auf die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten konzentriert. Nun geht der Bund einen Schritt weiter: Von den Bundesministerien für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), für Bildung und Forschung (BMBF) sowie für Wirtschaft und Technologie wurde das „Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie“ formuliert. Zusätzlich zu den Fördermitteln des BMWi für angewandte Forschung und technologische Entwicklung stellt das BMVBS rund 500 Mio. € für die Demonstration und Marktvorbereitung im Verkehr, in der Hausenergieversorgung und in der Industrie aber auch für portable Anwendungen für einen Zeitraum von 10 Jahren zur Verfügung. Die Demonstrationsmaßnahmen werden in der Regel als Leuchtturmprojekte realisiert, wodurch die öffentliche Wahrnehmung der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien deutlich erhöht wird. Vom BMVBS

wurde die NOW GmbH Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie zur sachgerechten Umsetzung der geplanten Demonstrationsmaßnahmen gegründet. Darüber hinaus übernimmt NOW die übergeordnete Koordination zu den Programmen der Bundesländer einerseits und zu den europäischen und internationalen Initiativen andererseits. Weiterhin wird von NOW der gezielte Rückfluss der Ergebnisse aus den Demonstrationsmaßnahmen zu den Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des BMWi organisiert.

#### **Ausblick**

Die Brennstoffzellentechnologie hat mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten das Potenzial, die heute etablierten Techniken zu ergänzen und teilweise zu verdrängen. Den Vorteilen, insbesondere dem hohen Wirkungsgrad (auch unter Teillastbedingungen und in kleinen Anlagen), stehen allerdings die nach wie vor hohen Herstellungskosten sowie die noch nicht wettbewerbsfähige Lebensdauer der jeweiligen Brennstoffzellensysteme gegenüber. „Ein Problem der Brennstoffzelle besteht darin“, sagt Professor Werner Tillmetz, „dass sie bei vielen Anwendungen in einem Verdrängungswettbewerb mit herkömmlichen, klassischen Energieumwandlungssystemen steht, etwa dem Verbrennungsmotor oder der Batterie. Da muss diese Technologie mithalten können, vor allem was Kosten, Robustheit oder Lebensdauer angeht. Dies ist derzeit noch nicht überall möglich.“



Fossil befeuerte Kraftwerke werden derzeit in der Öffentlichkeit kritisch diskutiert. Aber wir brauchen sie. Und neue Technologien machen sie immer effizienter und umweltfreundlicher. Ein Gespräch mit Prof. Dr. Alfons Kather, Leiter des Instituts für Energietechnik an der TU Hamburg-Harburg und Sprecher des Beirates zur COORETEC-Initiative des BMWi (CO<sub>2</sub>-Reduktionstechnologien).

## „Es gilt, Kohlendioxid abzutrennen und zu speichern“

? Die fossilen Energieträger sind begrenzt und müssen daher möglichst effizient genutzt werden. Wie kann Kraftwerkstechnologie dazu beitragen?

! Entscheidend ist die Steigerung des Wirkungsgrades. Je effektiver in den entsprechenden Kraftwerken jede Tonne des Brennstoffes – sei es Erdgas, Braunkohle oder Steinkohle – zur Energieerzeugung genutzt wird, desto sparsamer gehen wir mit den begrenzten Ressourcen um. Gleichzeitig wird dadurch auch pro erzeugter Energieeinheit weniger Kohlendioxid in die Umwelt abgegeben.

Darüber hinaus sollte meines Erachtens die Kraft-Wärme-Kopplung forciert werden. Das heißt: Neben dem erzeugten Strom muss auch die Wärme, die über den Kondensator und das Kühlwerk an die Umgebung abgegeben wird, genutzt werden. Auf diese Weise kann man noch einmal deutlich höhere Nutzungsgrade erreichen und den Brennstoff bestmöglich nutzen.

Diese Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades im konventionellen Kraftwerksteil ist um so wichtiger, als die technischen Verfahren, welche wir derzeit mit Hochdruck entwickeln, um Kohlendioxid aus den Kraftwerksprozessen abzutrennen, geologisch zu speichern und damit dauerhaft der Umwelt zu entziehen, zu großen Wirkungsgradverlusten führen. Solche modernen Kraftwerke mit integrierter CO<sub>2</sub>-Abtrennung sind nach meiner Auffassung die Kraftwerke der Zukunft.

? Warum ist diese CO<sub>2</sub>-Abscheidung so wichtig?

! Obgleich man die CO<sub>2</sub>-Emissionen beträchtlich mindern kann, wenn die alten kohlegefeuerten Kraftwerke durch solche nach dem neuesten Stand der Technik ersetzt werden, kann man die nationalen, europäischen und auch weltweiten CO<sub>2</sub>-Minderungsziele nur dann einhalten, wenn das CO<sub>2</sub> darüber hinaus abgeschieden wird.

? Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung kostet ihrerseits Energie. Ist die Abtrennung wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll?

! Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung hat dann einen Sinn, wenn wir uns sicher sind, dass CO<sub>2</sub> der Hauptverursacher des Klimawandels ist. Dann steht der ökologische Vorteil außer Zweifel. Allerdings kostet uns dies derzeit etwa 10 Prozentpunkte beim Wirkungsgrad. Wir versuchen

jedoch, diesen Wert zu senken. Ganz grob gesagt, bedeutet die Abtrennung einen um etwa 20 Prozent erhöhten Ressourcenverbrauch der fossilen Energieträger. Gleichzeitig erhöhen sich die Investitionskosten für die Kraftwerksanlagen. Das kostet also Geld. Der Strompreis für die privaten Endverbraucher wird sich dadurch um schätzungsweise 15 bis 20 Prozent, für industrielle Nutzer relativ betrachtet noch deutlich stärker erhöhen. Ob dies wirtschaftlich vertretbar ist, wird vom „Preis des CO<sub>2</sub>“ abhängen, also davon, wie stark man bestraft wird, wenn man eine gewisse Menge davon produziert und in die Atmosphäre entlässt.

? Kann man die gewaltigen Mengen an CO<sub>2</sub>, die dann anfallen werden, dauerhaft und umweltverträglich einlagern?

! Das ist eine Frage, die Geologen beantworten werden. Ich bin überzeugt, dass dies langfristig weder gesundheitliche Schäden für Menschen noch Umweltprobleme mit sich bringt. Die CO<sub>2</sub>-Speicherung ist nicht gefährlicher als die Erdgasspeicherung, die man heute schon vornimmt. Ein wirtschaftliches Risiko besteht höchstens darin, dass die Speicherstätten, in die man es hineinpumpt, möglicherweise zu früh aufgegeben und dann stattdessen neue Speicherstätten teuer erschlossen werden müssen.

Derzeit machen wir noch zu wenig an anwendungsnahe Forschung, um herauszufinden, was beim Transport des Kohlendioxids und bei der Speicherung in die potenziellen Speicherstätten geologisch und chemisch tatsächlich passiert. Diese Forschung benötigt größere Mengen an Kohlendioxid. Man müsste also so schnell wie möglich eine Anlage bauen, die das produziert. Dann könnte man die Speicherung sehr viel intensiver untersuchen.

? Sehen Sie Probleme bei der gesellschaftlichen Akzeptanz der fossil-befeuerten Kraftwerke, mit oder ohne CO<sub>2</sub>-Abtrennung und -Speicherung?

! Ja, und zwar insbesondere durch die emotionale Negativhaltung gegenüber der Kohle, die sich in jüngster Zeit herausbildet. Wir müssen durch offene und transparente Öffentlichkeitsarbeit dafür sorgen, dass die Bevölkerung erkennt, dass die Stromversorgung ohne Kohle nicht gesichert werden kann, und damit die Akzeptanz der Steinkohle wie auch der Braunkohle verbessern.

## Moderne Kraftwerkstechnologien



In unmittelbarer Nachbarschaft zum Braunkohlekraftwerk Schwarze Pumpe in Ostdeutschland arbeitet die erste Testanlage für das Oxyfuel-Verfahren: Die Pilotanlage emittiert 90 Prozent weniger  $\text{CO}_2$  im Vergleich zu konventionellen Kraftwerkstypen.

Im Vergleich zu dem Braunkohlekraftwerk, das direkt in der Nachbarschaft mit seinem massiven Kesselhaus und den zwei großen Kühltürmen aufragt, wirkt die neue Pilotanlage eher bescheiden. Und doch wird hier im brandenburgischen Ort Spremberg, am Standort „Schwarze Pumpe“, Kraftwerkstechnik der Zukunft entwickelt. In der Lausitz zwischen Cottbus und Dresden nahm im September 2008 die weltweit erste Pilotanlage für einen Kraftwerkstypus, der 90 Prozent weniger Kohlendioxid ausstößt als konventionelle Kraftwerke, ihren Betrieb auf. Die mit Braunkohle gefeuerte Anlage des Energieunternehmens Vattenfall basiert auf dem so genannten Oxyfuel-Verfahren. Im Zuge dieses Prozesses wird  $\text{CO}_2$  bis auf eine Reinheit von 98 bis 99 Prozent konzentriert, so dass es anschließend verflüssigt, komprimiert und dauerhaft in einer unterirdischen Lagerstätte gespeichert werden kann. Mit 30 Megawatt ist die Feuerungsleistung dieser Testanlage noch bescheiden; hier wird zunächst auch nur Wasserdampf erzeugt. Die Erkenntnisse aus der Testphase sollen dann ab dem Jahr 2012 in ein Demonstrationskraftwerk münden, das etwa die 25fache Feuerungsleistung erreichen und Strom erzeugen

soll. Spätestens im Jahr 2015, so schätzen Fachleute, wird man dann Klarheit darüber haben, ob dieses Verfahren zuverlässig und wirtschaftlich und im großtechnischen Maßstab umsetzbar ist.

Ähnlich wie in „Schwarze Pumpe“ entstehen derzeit an mehreren Stellen in Deutschland – und ebenso in Europa und in anderen Industrienationen – einige Pilotanlagen, bei denen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen, die alle ein Ziel haben: Kraftwerke, die mit fossilen Brennstoffen (Kohle oder Erdgas) betrieben werden und dennoch emissionsarm sind. Das gilt vor allem für das klimaschädliche Treibhausgas Kohlendioxid.

40 Prozent des global vom Menschen verursachten  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes stammen aus Kraftwerken, in denen fossile Energieträger verbrannt werden; die Kohle (Braun- oder Steinkohle) hat daran wiederum einen Anteil von 80 Prozent. Der unvermindert zunehmende Energiebedarf, insbesondere in den so genannten Aufholländern wie China, Indien oder Brasilien, dürfte die  $\text{CO}_2$ -Emissionen in den kommenden Jahrzehnten noch ansteigen lassen. Fossile Ener-

gieträger werden dennoch weiterhin weltweit eine zentrale Rolle spielen: So geht zum Beispiel die Internationale Energieagentur (IEA) davon aus, dass auch bei einem starken Ausbau der regenerativen Energien und einem signifikanten Anstieg der Energieeffizienz die fossilen Energieträger im Jahr 2050 noch immer rund 70 Prozent des Weltenergiebedarfs decken müssen.

Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in unserer Atmosphäre ist nach Einschätzung des Weltklimarats (IPCC) jedoch die Hauptursache für den globalen Klimawandel. Gleichzeitig hat sich weltweit die Erkenntnis durchgesetzt, dass fossile Brennstoffe nur begrenzt verfügbar und daher zunehmend kostbarer und teurer werden. Mit diesen Energiequellen sparsam umzugehen und gleichzeitig den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu verringern, ist daher ökologisch wie ökonomisch ein sinnvolles Ziel.

In Deutschland ist die Forschung auf diesem Gebiet seit einigen Jahren in der Forschungs- und Entwicklungsinitiative COORETEC (Kohlendioxid-Reduktionstechnologien) gebündelt, die vom BMWi unterstützt und finanziell gefördert wird. Gemeinsam mit der Energiewirtschaft, dem Anlagenbau und der Forschung ist das Konzept „Leuchtturm COORETEC“ erarbeitet worden: Der Leuchtturm zeigt, wie fossil befeuerte Kraftwerke zukunftsfähig gemacht werden können. Die zentralen Ziele dabei sind Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit.

„Die Forschung und Entwicklung in COORETEC ist nach den verschiedenen technologischen Prozessen organisiert, die hier eine Rolle spielen“, erklärt Prof. Alfons Kather, der an der Technischen Universität Hamburg-Harburg lehrt und derzeit Sprecher des Beirats der COORETEC-Initiative ist. „Neu an diesem Programm ist, dass Gesamtprozesse untersucht werden und nicht wie früher die Einzelkomponenten für sich.“ Der Beirat umfasst fünf Arbeitsgruppen: Diese beschäftigen sich mit dem erdgasbefeuerten Kombikraftwerk (GuD), dem kohlebefeuerten Dampfkraftwerk mit verschiedenen möglichen nachgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheideverfahren, der Kohlevergasung mit einer integrierten CO<sub>2</sub>-Abtrennung (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC), dem Oxyfuel-Prozess (Verbrennung in einer O<sub>2</sub>-Atmosphäre) sowie den

geochemischen und technologischen Grundlagen von CO<sub>2</sub>-Transport und -Speicherung. Mit dem GEOTECHNOLOGIEN-Programm sind auch Fördermaßnahmen des BMBF zur CO<sub>2</sub>-Speicherung in den Beirat integriert.

Die prozessorientierte Struktur des Programms hat den Vorteil, dass die Forschung auf die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Technologien zugeschnitten und gezielt verbessert werden kann. „Wir schauen in alle Vorgänge hinein, um schwache Glieder in der Prozesskette aufzuspüren und auszuschließen“, so Kather. Zu allen Arbeitsgruppen gehören jeweils Vertreter von Forschungseinrichtungen sowie der Industrie.

Ergänzt werden die fünf Arbeitsgruppen durch die Arbeitsgemeinschaft Turbomaschinen, die sich mit der Weiterentwicklung und Optimierung von Turbinen und Verdichtern für die verschiedenen Kraftwerksprozesse beschäftigt. Weitere Informationen zu COORETEC sind unter [www.cooretec.de](http://www.cooretec.de) zu finden.

Den Kohlendioxidausstoß von Kraftwerken zu verringern, lässt sich auf zwei Wegen erreichen. Man kann zum einen den Wirkungsgrad der Kraftwerke erhöhen: Auf diese Weise wird der verfügbare Brennstoff effektiver genutzt und gleichzeitig pro erzeugter Kilowattstunde Strom weniger CO<sub>2</sub> an die Umwelt abgegeben. Der zweite Weg besteht darin, das anfallende Kohlendioxid innerhalb eines Kraftwerks abzutrennen, sei es vor oder nach dem eigentlichen Verbrennungsprozess (Pre oder Post Combustion Capture). Zurzeit stehen dafür drei unterschiedliche Technologien zur Verfügung: Von diesen basieren der Post Combustion Capture Prozess und der Oxyfuel Prozess auf dem Dampfkraftwerksprozess und der Pre Combustion Prozess auf dem so genannten IGCC-Prozess.

Nach der Abtrennung muss das CO<sub>2</sub> verdichtet, zu geeigneten unterirdischen Lagerstätten transportiert und dort dauerhaft und sicher gespeichert werden. Hierfür kommen entweder ehemalige Erdgas- oder Erdöllagerstätten oder tiefe, Salzwasser führende Gesteinsschichten (so genannte saline Aquifere) in Frage. Solche Abscheide- und Speicherungsverfahren fasst man heute unter dem Schlagwort „Carbon Capture and Storage“ (CCS) zusammen.



Die zurzeit größte Gasturbine der Welt, SGT5-8000H, wurde von Siemens in Berlin hergestellt.



Am 20.12.2007 wurde die SGT5-8000H im Kraftwerk Irsching bei Ingolstadt im Beisein von Bundeswirtschaftsminister Michael Glos erstmals gezündet

Langfristige technische Ziele des „Leuchtturms COORETEC“ sind:

- ▶ Die Wirkungsgrade der Basisprozesse Dampfkraftwerk und IGCC auf über 50 Prozent zu steigern,
- ▶ die Kosten für Abtrennung und Speicherung von CO<sub>2</sub> deutlich zu senken,
- ▶ den Wirkungsgradverlust durch die dazu notwendigen Prozesse von heute (geschätzten) 12 bis 13 Prozentpunkten auf deutlich unter zehn zu verringern, und
- ▶ alle technischen Systeme so zuverlässig und flexibel zu gestalten, dass sie auf die sich permanent verändernden Bedingungen auf den internationalen Strom- und Energiemärkten rasch und effektiv zu reagieren vermögen.

### Gas- und Dampf-Kombikraftwerke (GuD)

In einer Gasturbine (GT) wird das heiße Abgas eines Verbrennungsprozesses als Antrieb einer Turbine und – über einen angekuppelten Generator – zur Stromerzeugung genutzt. Zunächst saugt ein Verdichter Luft an und führt sie der Brennkammer zu. Dort wird die verdichtete Luft zusammen mit dem Brennstoff (Erdgas oder leichtes Heizöl) verbrannt. Es entsteht ein Abgas mit einer Temperatur um 1350 Grad Celsius und einem Druck von bis zu 35 bar, das in die Turbine strömt. Dort verliert es an Druck und Temperatur, die

Fachleute sagen: „Es entspannt sich“, und gibt so seine Energie an die Turbinenschaufeln ab, wodurch die Turbinenwelle in Rotation versetzt wird und über eine Kupplung den Generator antreibt.

Wenn das Gas die erste Reihe von Schaufeln erreicht, hat es eine Ausgangstemperatur von rund 1350 Grad Celsius. Am Ausgang der Turbine ist es dann auf rund 600 Grad abgekühlt. Der Wirkungsgrad einer Gasturbine ist umso größer, je höher die Eintrittstemperatur bei einem optimalen Druck des Gases ist. Man kann allerdings Temperatur und Druck nicht beliebig erhöhen, sondern nur so weit, wie das Material der Turbinenbauteile dies unbeschadet zulässt. Technologische Fortschritte bei der Beschichtung und der Kühlung dieser Bauteile haben in den letzten Jahrzehnten bereits eine enorme Steigerung der Gastemperatur ermöglicht. Die derzeit leistungsfähigste Gasturbine der Welt erreicht eine elektrische Leistung von 340 Megawatt; sie wird derzeit im E.ON Kraftwerk Irsching vom Herstellerunternehmen Siemens Power Generation getestet. Das BMWi unterstützt die wissenschaftliche Begleitung dieser Tests mit Fördergeldern.

Reine Gasturbinenkraftwerke erreichen heute einen Wirkungsgrad von knapp 40 Prozent; dieser Wert – und damit die Ausbeute des Brennstoffes – kann enorm gesteigert werden, wenn der Gasturbinenprozess mit einem Dampfturbinenprozess gekoppelt wird. Das noch viele hundert Grad heiße Abgas



Die SGT5-8000H leistet im Kraftwerk Irsching 340 Megawatt. Nach der Testphase wird diese Anlage zu einem hocheffizienten GuD-Kraftwerk mit einer Leistung von rund 530 Megawatt und einem Wirkungsgrad von über 60 Prozent erweitert.

der Gasturbine wird dabei zur Erzeugung von Wasserdampf genutzt, der dann nachgeschaltete Dampfturbinen antreibt. Man spricht in diesem Fall von Gas- und Dampf-Kombikraftwerken (GuD-Kraftwerken). Sie erreichen schon heute einen Wirkungsgrad von knapp unter 60 Prozent.

Zentrales Ziel der Forschungsarbeiten ist, wie bei allen anderen Kraftwerkstechnologien, den Wirkungsgrad weiter zu erhöhen. Denn jede Steigerung bedeutet eine bessere Ausnutzung des Brennstoffes und gleichzeitig einen verringerten Ausstoß von Kohlendioxid im Verhältnis zur erzeugten Leistung. Das Ziel der Ingenieure ist es, bis zum Jahr 2020 beim GuD-Prozess einen Wirkungsgrad von 63 Prozent zu realisieren. Dazu muss man die Temperatur des Gases, das die Turbine antreibt, auf mehr als 1500 Grad erhöhen und die Effektivität, sprich den inneren Wirkungsgrad von Verdichter und Turbine steigern.

Für die anvisierte Temperatur sind die heute verwendeten Materialien und Bauteile der Turbomaschinen nicht ausgelegt. Hier setzt die Forschung an. Es gilt, widerstandsfähige Schutzschichten zu entwickeln, die Brennkammer und Turbinenschaufeln vor dem heißen Abgas schützen. Dazu dienen heute Keramikwerkstoffe wie Zirkoniumoxid, die aber noch ver-

besserungsfähig sind. Ergänzend sucht man neuartige Materialien, wobei zum Teil mehrere Schichten aus unterschiedlichem Material möglich sind. Ähnliche Schutzeffekte kann man auch durch eine noch wirkungsvollere Kühlung der Bauteile erreichen. Dazu werden alle Komponenten des aufwändigen und komplizierten Kühlsystems, insbesondere im Inneren der Schaufeln, unter die Lupe genommen. Wirkungsgradverluste entstehen auch als Folge von Leckagen, so dass die unterschiedlichen Dichtungssysteme (mechanische Dichtungen oder Sperrluftdichtungen) einer solchen Turbomaschine Ansatzpunkte für die Forschung darstellen.

Gleichzeitig wird daran gearbeitet, die Aerodynamik im Verdichter und in der Turbine zu optimieren, um die inneren Wirkungsgrade der Bauteile zu steigern. Eine weitere Erfolgsvoraussetzung besteht darin, den beim GuD-Kraftwerk gekoppelten Gas- und Dampfturbinenprozess noch besser aufeinander abzustimmen, zum Beispiel indem man die Austrittstemperatur des Gasturbinenabgases und die Temperatur des Dampfkraftprozesses optimal anpasst.

Insgesamt gibt es in einer derart komplexen Anlage unzählige „Stellschrauben“, an denen die Ingenieure „drehen“ können, um die Prozesse fortlaufend zu optimieren. Allerdings beeinflussen sich

diese Prozesse in der Regel gegenseitig so stark, dass eine Veränderung an der einen Schraube automatische Auswirkungen auf viele andere hat. Ein Beispiel: Eines der am höchsten belasteten Bauteile einer Gasturbine ist die Hinterkante der Turbinenschaufeln. Aus Gründen der Aerodynamik (Verhinderung von Strömungswirbeln) sollte diese so schmal wie möglich sein; allerdings ist gerade hier die thermische und mechanische Belastung des Materials am höchsten. Gleichzeitig darf die Herstellung dieser Bauteile nicht ungebremste Kosten verursachen. Es gilt also, Kompromisse zu finden, die den Konflikt zwischen Festigkeit, Temperaturbeständigkeit, Strömungsverhalten und Fertigungskosten bestmöglich austarieren.

Eine Abtrennung des Kohlendioxids erfolgt bei GuD-Kraftwerken am günstigsten in Form eines Post Combustion Capture-Prozesses. Dazu leitet man die Abgase der Gasturbine in eine „Waschanlage“, in der mit Hilfe von chemischen Prozessen das Treibhausgas entfernt wird (siehe dazu: „Eine Wäsche für Kohlendioxid“ auf Seite 68).

### Kohle-Dampfkraftwerke

In Dampfkraftwerken werden Brennstoffe, zum Beispiel Braun- oder Steinkohle, in Dampferzeugern (Kesseln) verbrannt, um Wasserdampf unter hohem Druck zu erzeugen. Dieser wird über Rohrleitungen zu einer Turbine geleitet, die durch die Entspannung des Dampfes in Rotation versetzt wird und über eine Kupplung einen Stromgenerator antreibt. Während der Dampf durch die Turbine strömt, kühlt er ab und beginnt, zu Wassertropfen zu kondensieren. Der Turbine ist ein Kondensator nachgeschaltet, in welchem der Dampf wieder vollständig zu Wasser kondensiert. Eine Dampfturbine besteht aus einem Hochdruck-, einem Mitteldruck- und einem Niederdruckteil. Die Schaufeln in den Sektoren sind unterschiedlich gestaltet, um die jeweiligen Druckverhältnisse optimal auszunutzen. Im Niederdruckbereich werden die längsten Schaufeln eingesetzt: Sie erreichen in modernen Anlagen bis zu zwei Meter Länge.

Die derzeit modernste Generation an Braunkohlekraftwerken erreicht Wirkungsgrade von 43 Prozent, Steinkohleanlagen dagegen rund 46 Prozent. Im



Dampfturbine im GuD-Kraftwerk Mainz-Wiesbaden. Mit einem Wirkungsgrad von 58 Prozent ist es eines der effizientesten der Welt.

Durchschnitt aller (alten und neuen) Anlagen haben die Kohlekraftwerke in Deutschland gegenwärtig eine Effizienz von 38 Prozent; weltweit beträgt dieser Wert nur 30 Prozent. „Würde man alle steinkohle-gefeuerten Dampfkraftwerke auf der Welt durch solche nach dem neuesten Stand der Technik ersetzen“, so betont Professor Alfons Kather, „dann würde dies für diese Anlagen eine Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 35 Prozent bedeuten.“

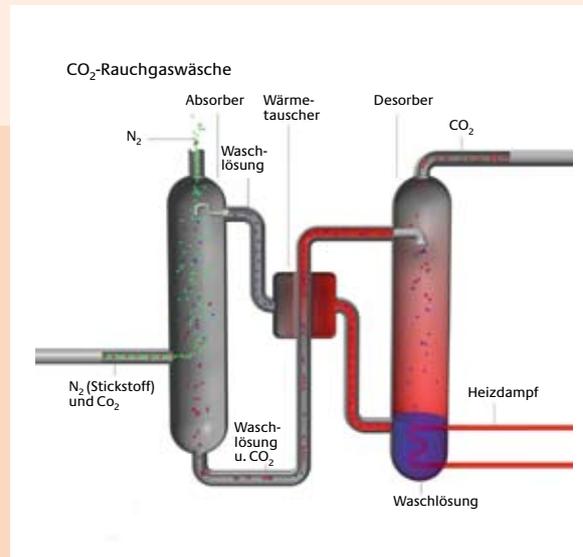
Die heutigen Bestmarken wurden erreicht, indem man alle Komponenten eines Dampfkraftwerkes verbesserte. Dazu gehören vor allem die so genannten Dampfparameter: Darunter versteht man die maximalen Werte für Druck und Temperatur des Dampfes, der zur Turbine geleitet wird. Man kann sagen: Je heißer der Dampf, desto wirkungsvoller der Prozess. Daneben hat man aber auch zahlreiche andere Prozesse in den Anlagen optimiert. Dazu gehört die Effektivität der Dampferzeugung (im Kessel), der Kondensatordruck, die regenerative Speisewasservorwärmung, der Eigenbedarf oder die Strömung am Ende der Dampfturbine. Der Wirkungsgrad lässt sich zum Beispiel steigern, indem man die letzte Stufe (Niederdruck) einer solchen Dampfturbine mit möglichst großem Querschnitt konstruiert; entsprechend muss auch die Länge der Turbinenschaufeln mitwachsen. Dies stößt allerdings wegen der hohen mechanischen Belastung an materialtechnische Grenzen: Eine solche Turbine rotiert immerhin in der Regel mit 1500 beziehungsweise 3000 Umdrehungen pro Minute.



Die Schaufeln großer Dampfturbinen können in ihrem Niederdruckteil mannshoch sein.

„Die prozessbedingten Verbesserungen sind heute bereits weitgehend ausgeschöpft“, berichtet Kather. „Wenn man also den Wirkungsgrad weiter steigern möchte, muss dies im Wesentlichen durch eine Erhöhung der Dampfparameter erfolgen.“ Während in der derzeit im Bau befindlichen Generation an Kraftwerken der Dampf rund 600 Grad Celsius heiß ist und einen Druck von rund 280 bar besitzt, soll dies in der nächsten Generation auf 700 Grad Celsius und 350 bar gesteigert werden. Ziel ist ein Wirkungsgrad von 50 Prozent. Dieser Fortschritt wird nur möglich sein, wenn alle prozessbedingten Potenziale von der Forschung erneut in Angriff genommen werden – durch entsprechende Detailverbesserungen an den verschiedenen Komponenten der Anlage. Dazu gehören neue Materialien für die Niederdruckschaufeln (Titan-Aluminium-Legierungen) oder für den Dampferzeuger mit seinen Dampfregelventilen (Nickelbasislegierungen).

Entwicklungsarbeiten zu diesen Themen werden in Deutschland an verschiedenen Stellen verfolgt. Ein Förderschwerpunkt des BMWi ist der Test der Materialien, die für 700-Grad-Celsius-Kraftwerke in Frage kommen, und zwar hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens und ihres Verhaltens unter „echten“ Korrosionsverhältnissen. So wird 2009 in Mannheim eine Testschleife für die 700-Grad-Celsius-Technologie in Betrieb gehen, von der wichtige Aufschlüsse für die Praxis erwartet werden. Der Energieversorger E.ON geht noch weiter. Er hat im September 2007 angekündigt, bis zum Jahr 2014 in Wilhelmshaven ein 500-Megawatt-Demonstrationssteinkohlekraftwerk



Prinzip-Darstellung der CO<sub>2</sub>-Wäsche. RWE baut eine Pilotanlage an seinem Kraftwerksstandort Niederaußem.

nach der neuen Technologie (700 Grad Celsius und 350 bar) zu errichten, das erstmalig für ein Dampfkraftwerk die magische Wirkungsgradgrenze von 50 Prozent überschreiten soll.

Der verstärkte Einsatz von erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung stellt auf dem Strommarkt inzwischen neue Anforderungen: Bei den konventionellen Anlagen sind zunehmend höhere Flexibilität und ein effektives Verhalten auch unter Teillast gefragt. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen für die Technik: Auch Dampfkraftwerke müssen in Zukunft möglichst rasch hoch- und heruntergefahren werden können; sie sollen außerdem beim Betrieb unterhalb der maximal möglichen Leistung einen hohen Wirkungsgrad und niedrige Emissionen aufweisen. Heute nutzt die Forschung umfangreiche Modellierungs- und Simulationsverfahren, um das Verhalten von Turbinen und weiteren Kraftwerkskomponenten unter Teillast zu untersuchen. Auf diese Weise lernt man, die Strömungsverhältnisse und deren Auswirkungen auf die Bauteile besser zu verstehen.

Da Braunkohlekraftwerke in der Regel zu weit von Ballungszentren entfernt liegen, kommt die Kraft-Wärme-Kopplung zur Verbesserung der Energieausnutzung meist nicht in Frage. Es bietet sich jedoch eine andere Technologie zur Erhöhung der Energieausnutzung an: die Braunkohletrocknung mit relativ geringwertigem so genannten Anzapfdampf aus der Dampfturbine. Zwar wird dadurch etwas weniger

Strom mit dem Niederdruckteil der Turbine erzeugt, aber der Heizwert der Kohle wird verbessert, so dass in Summe ein Anstieg des elektrischen Wirkungsgrads um 3 bis 5 Prozentpunkte erreicht wird. Diese Technik wird von verschiedenen Stromversorgern mit jeweils etwas unterschiedlichen Ansätzen entwickelt und auch durch das BMWi gefördert.

### Eine Wäsche für Kohlendioxid

Bei der Abscheidung aus dem Rauchgas, der so genannten Post Combustion Capture (PCC), wird das CO<sub>2</sub> zunächst aus dem Abgas, in dem es bei einer normalen Verbrennung mit einer Konzentration von 12 bis 15 Prozent vorliegt, im so genannten Absorber herausgewaschen. Anschließend trennt man „Waschmittel“ und CO<sub>2</sub> wieder voneinander (Regeneration); dabei wird ein hochkonzentrierter CO<sub>2</sub>-Strom erzeugt, den man anschließend auf hohen Druck verdichtet, um ihn über ein nachgeschaltetes Pipelinesystem einer Speicherstätte zuzuführen. Die CO<sub>2</sub>-Wäsche kann mit Hilfe von flüssigen Lösungsmitteln erfolgen; dazu dienen zum Beispiel organische Stoffe wie Amine; eine in der Chemischen Industrie hierfür häufig eingesetzte Substanz ist Monoethanolamin (MEA). Das Amin wird in den Strom des Rauchgases eingesprüht; durch eine chemische Reaktion nimmt es das CO<sub>2</sub> auf und wird in den Regenerator gepumpt. Dort wird das Lösungsmittel mit Hilfe von bis zu 130 Grad heißem Dampf regeneriert und dabei das CO<sub>2</sub> als konzentriertes Gas abgetrennt. Danach kann man das Amin erneut in den Abscheideprozess zurückführen.

Dieser Regenerationsprozess verbraucht sehr viel Energie. Immerhin muss man dafür rund 60 bis 70 Prozent des Dampfes abzweigen, der in den Niederdruckteil der Kraftwerksturbine strömt. Es ist daher wichtig, den Prozess der CO<sub>2</sub>-Wäsche optimal mit dem eigentlichen Dampfkraftprozess zu koppeln, um die Wirkungsgradverluste so gering wie möglich zu halten. Die Gestaltung der Dampfturbinen muss bereits auf den nachfolgenden Abscheidungsprozess zugeschnitten sein.

Eine CO<sub>2</sub>-Abtrennung mit Hilfe der Aminwäsche ist für industrielle Anwendungen bereits etabliert. Weltweit existieren einige derartige Anlagen; man

kann also auf vorhandene Erfahrungen zurückgreifen. Allerdings unterscheiden sich die Randbedingungen der existierenden Anlagen signifikant von denen eines mit Kohle befeuerten Kraftwerks (Gaszusammensetzung, Volumenströme, Verunreinigungen). Bevor man diese Technik in kohlegefeuerten Großkraftwerken einsetzen kann, besteht daher noch erheblicher Entwicklungsbedarf.

Die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet konzentrieren sich unter anderem darauf, neue Lösungsmittel oder Lösungsmittelgemische zu entwickeln und zu erproben, die zum einen für ihre Regeneration weniger Dampf benötigen und daher den Energieaufwand verringern. Zum zweiten will man eine größere Beladung der Waschlösung mit Kohlendioxid erreichen: Sie soll möglichst viel CO<sub>2</sub> pro Volumen aufnehmen können.

Eine Testanlage für die CO<sub>2</sub>-Wäsche hinter einem Braunkohlekraftwerk wird in Kürze im RWE-Kraftwerk Niederaußem mit Förderung des BMWi errichtet. Man erhofft sich wichtige Erkenntnisse zum Langzeitverhalten verschiedener Waschmittel unter den Randbedingungen des Kraftwerksbetriebs.

Eine Absorption ist auch mittels trockener Verfahren möglich, etwa mit Kalziumoxid, das in Form von Kalkstein in großen Mengen verfügbar und preiswert ist. Für dieses Verfahren gibt es bereits Erfahrungen aus technischen Anlagen, in denen Schwefeldioxid aus Rauchgasen entfernt wird. Im Fall der CO<sub>2</sub>-Abscheidung müssen die Kalziumverbindungen allerdings wieder regeneriert werden, um nicht zu große Mengen Kalkstein zu verbrauchen (bei der Herstellung von Kalziumoxid aus Kalkstein fällt wiederum CO<sub>2</sub> an). Dazu hat man sich ein Verfahren überlegt, das als Carbonate-Looping bezeichnet wird. Allerdings gibt es hier noch erheblichen Entwicklungsbedarf. Die nächsten Schritte werden darin bestehen, Pilotanlagen zu errichten, in denen verschiedene Absorptionsmittel und -verfahren getestet werden können.

„Die nachgeschaltete Wäsche verursacht im Vergleich zum Oxyfuel-Prozess und dem IGCC mit vorgegeschalteter CO<sub>2</sub>-Abtrennung die höchsten Wirkungsgradverluste, besitzt aber dennoch einen großen Vorteil, weil sie auf dem sehr zuverlässigen Dampf-



Versuchsanlage zum Oxyfuel-Prozess mit Rektifikation der Rauchgase zur Erzielung höchster Reinheiten an der TU Dresden.

kraftprozess aufbaut“, resümiert COORETEC-Beirats-sprecher Alfons Kather: „Damit kann das Risiko klein gehalten werden, dass im Zuge der Entwicklungsarbeiten irgend etwas im Kraftwerksprozess nicht funktioniert.“ Weiterer Vorteil ist, dass sich dieser Prozess in bestehende Kraftwerke integrieren lässt. Ein Nachteil dieses Prozesses ist neben den hohen Wirkungsgradverlusten der Verbrauch von Waschflüssigkeit, weil diese permanent infolge von chemischen Reaktionen mit bestimmten Bestandteilen des Rauchgases verloren geht. Ein Ziel der Entwicklungsarbeiten besteht daher auch darin, den Waschmittelverbrauch möglichst gering zu halten, etwa durch eine verbesserte Reinigung des Rauchgases.

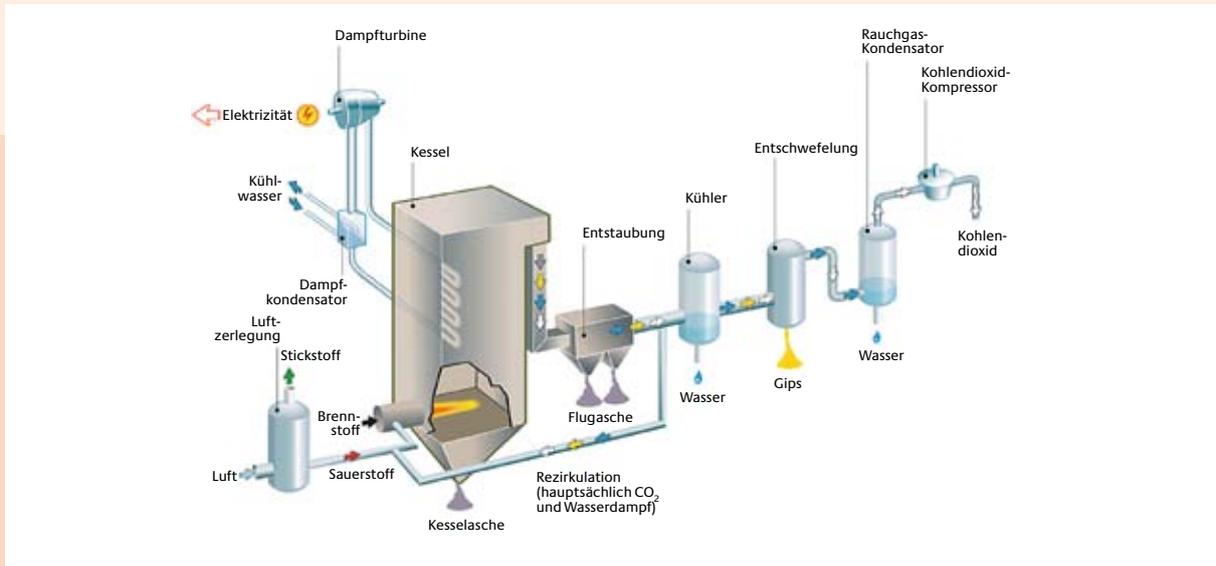
### Verbrennung mit Sauerstoff: der Oxyfuel-Prozess

Einen ganz anderen Weg zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung verfolgt der so genannte Oxyfuel-Prozess, der ebenfalls auf dem Dampfkraftprozess basiert. Dabei entnimmt

man der Luft, die der Verbrennung zugeführt werden soll, mit Hilfe einer Luftzerlegungsanlage den Stickstoff; auf diese Weise gelangt fast reiner Sauerstoff in den Verbrennungsprozess. Demzufolge sind im Rauchgas fast nur noch Wasserdampf und Kohlendioxid enthalten: Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wird wegen der fehlenden Verdünnung durch den Luftstickstoff von normalerweise etwa 15 auf rund 66 Prozent angehoben. Da die Verbrennung von Kohle mit reinem Sauerstoff zu sehr hohen Temperaturen führt, müssen rund zwei Drittel der Rauchgase abgekühlt, zum Brenner zurückgeführt und mit dem Sauerstoff vermischt werden, bevor dieser in den Brennraum eingespeist wird.

Wenn man das entstandene Rauchgas anschließend trocknet, wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration auf etwa 89 Prozent angehoben. Die dann noch enthaltenen 11 Prozent Verunreinigungen – es handelt sich um überschüssigen Sauerstoff, Argon, geringe Mengen an Stickstoff, Schwefeldioxid und Stickstoffoxiden – sind allerdings für eine unterirdische Lagerung immer noch zu hoch. Man geht heute davon aus, dass insbesondere Sauerstoff, Schwefel- und Stickoxide Probleme bereiten, wenn das damit verunreinigte CO<sub>2</sub> in Rohrleitungen transportiert und dann wie geplant in geologische Formationen im Untergrund eingelagert wird. Hier kann es einerseits in der Pipeline zu Korrosionseffekten kommen, zum anderen besteht die Gefahr von unerwünschten geochemischen Reaktionen in den Lagerstätten.

Daher gilt es, die Verunreinigungen zu entfernen und die Konzentration des CO<sub>2</sub> durch zusätzliche Maßnahmen weiter anzuheben, so dass zum Schluss maximal ein bis zwei Prozent an Verunreinigungen übrig bleiben. Eine Möglichkeit dazu ist die so genannte kryogene Verflüssigung. Das Rauchgas wird dabei unter Druck auf bis zu minus 50 Grad Celsius abgekühlt. Es entsteht reineres flüssiges CO<sub>2</sub>, das abgetrennt werden kann. Der allergrößte Teil der Verunreinigungen verbleibt dagegen im nicht verflüssigten Rauchgas und wird mit dem Abgas aus der Anlage an die Umgebung abgegeben. Der darin enthaltene CO<sub>2</sub>-Anteil bewirkt, dass – wie auch bei den anderen Abtrennverfahren – nur etwa 90 Prozent des CO<sub>2</sub> abgetrennt wird. Die flüssige CO<sub>2</sub>-Phase erreicht auf diesem Wege eine Reinheit von etwa 98 bis 99 Prozent. „Dies würde nach bisherigem Kenntnisstand



Schematische Darstellung des Oxyfuel-Prozesses.

ausreichen, um das Kohlendioxid problemlos transportieren und in eine Lagerstätte einbringen zu können“, so die Einschätzung von Alfons Kather.

Inwiefern Verunreinigungen im verflüssigten Kohlendioxid – und in welchen Konzentrationen – bei der Einlagerung Probleme verursachen können, etwa durch Wechselwirkungen mit geologischen Formationen, wird derzeit im Rahmen von COORETEC ebenfalls untersucht (siehe „Kohlendioxidspeicherung“ auf Seite 73). Sollte sich dabei zum Beispiel herausstellen, dass die noch vorhandenen Restkonzentrationen an Schadgasen nicht tolerierbar sind, müssten sie durch entsprechende Rauchgasreinigungsverfahren eliminiert werden. Dies würde dann allerdings bedeuten, dass beim Wirkungsgrad weitere Verluste eintreten. Entsprechende Untersuchungen zur Rauchgasreinigung werden zurzeit an der Technischen Universität Dresden in einer Versuchsanlage (siehe Abbildung S. 69) durchgeführt.

Welche Art von Problemen beim Oxyfuel-Prozess durch Forschung zu klären sind, zeigt das Beispiel des so genannten Luftüberschusses: Wenn man Kohle verbrennt, muss man mehr Sauerstoff zugeben, als rein chemisch eigentlich benötigt wird. Dies liegt daran, dass die Zufuhr von Kohlestaub und dessen Verteilung in der Brennkammer niemals so präzise steuerbar und messbar sind, dass man die Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr immer exakt aufeinander abzustimmen vermag. Wird die Kohle aber mit zu wenig Sauerstoff verbrannt, verbrennt sie unvollständig, und es kommt zu Korrosionserscheinungen an der Wand der

Brennkammer. Bei heutigen Kraftwerken beträgt der Sauerstoffüberschuss, den man sicherheitshalber zugibt, mindestens 17 Prozent. In früheren Forschungsarbeiten hatte man berechnet, dass ein bis fünf Prozent ausreichend seien; diese Ergebnisse gelten inzwischen als überholt: Die Werte trafen ausschließlich für Versuche im Labormaßstab zu, nicht aber für großtechnische Anlagen.

Beim Oxyfuel-Prozess hat der Sauerstoffüberschuss große Bedeutung: Je weniger  $O_2$  man als Überschuss zugibt, desto geringer sind die Verunreinigungen im Endprodukt der Abscheidung, also im flüssigen Kohlendioxid. Untersuchungen an der Technischen Universität Hamburg-Harburg im Rahmen von COORETEC haben gezeigt, dass ein Überschuss von 15 Prozent notwendig, aber auch ausreichend ist. Dieser Wert gilt inzwischen als allgemein akzeptierter Standard.

Die Pilotanlage am Standort „Schwarze Pumpe“ (siehe Anfang des Kapitels) hat insofern große Bedeutung, als erst hier die eigentlichen betrieblichen Abläufe untersucht und offene Fragen geklärt werden können. Die Anlage simuliert im Kleinen alle entscheidenden Komponenten, beinhaltet also einen Dampferzeuger, eine Luftzerlegungsanlage, eine Rauchgasreinigung und eine  $CO_2$ -Abscheidung. Erst in einer solchen Anlage kann etwa geklärt werden, ob der integrierte Oxyfuel-Verbrennungsprozess möglicherweise die Flexibilität des gesamten Kraftwerkes, also häufige Lastwechsel, erschweren wird oder nicht.

Ein zukünftiges Kraftwerk, das mit einer Oxyfuel-Feuerung ausgestattet wäre, hätte einen spürbar geringeren Wirkungsgrad als heute üblich. Denn die Luftzerlegung, die CO<sub>2</sub>-Abscheidung sowie die Abtrennung der Verunreinigungen kosten ihrerseits Energie. Der Wirkungsgrad dürfte daher auf etwa 36 Prozent sinken. Das ist der – nach heutigem Stand unvermeidliche – Preis für die Reduktion des Treibhausgases Kohlendioxid. Fortschritte sind in der Zukunft zu erreichen, indem man zum einen den Prozess der Luftzerlegung und der CO<sub>2</sub>-Abscheidung energetisch optimiert und parallel dazu dafür sorgt, dass der gesamte Oxyfuel-Prozess bestmöglich in den Dampfkraftwerksprozess integriert wird.

Inzwischen befindet sich bereits eine zweite Generation dieser Technologie in Entwicklung, die man unter den Begriff Oxycoal fasst. Dabei wird der bisher genutzte, sehr energieaufwändige Prozess der Luftzerlegung durch ein Membranverfahren ersetzt. Verwendet wird ein keramisches Membranmodul, das bei einer Temperatur von mehr als 700 Grad selektiv Sauerstoff passieren lässt und auf diese Weise Stickstoff und Sauerstoff voneinander zu trennen vermag. Das Verfahren hat den zusätzlichen Vorteil, dass ein Teil der Energie, die hierfür benötigt wird, anschließend zurückgewonnen werden kann, indem man die vom Sauerstoff befreite heiße Luft in einer Turbine zur Stromgewinnung nutzt. Die Forschung konzentriert sich hier im Moment darauf, geeignete Membranmodule für einen großtechnischen Einsatz zu entwickeln, die dauerhaft stabil sind und eine ausreichend hohe Sauerstoffabtrennung ermöglichen. Darüber hinaus sind zahlreiche konstruktive Fragen zu klären, um zum Beispiel auch bei Temperaturschwankungen einen leckagefreien Betrieb zu gewährleisten.

Ein anderes wohl ebenfalls erst in weiterer Zukunft einsatzfähiges Verfahren ist die so genannte Chemical Looping Combustion (CLC). Anders als bei der konventionellen Verbrennung unter Luft- bzw. Sauerstoffzugabe wird dabei ein Metalloxid als Sauerstoffträger eingesetzt, zum Beispiel Nickel- oder Eisenoxid. Bei dem Verfahren erfolgen die Luftzerlegung und der Verbrennungsprozess in zwei unterschiedlichen, parallel geschalteten Reaktoren. In dem einen Reaktor (Oxidationsreaktor) wird das Metall oxidiert und nimmt auf diese Weise den Sauerstoff

aus der Luft auf. Im anderen Reaktor (Verbrennungsreaktor) gibt das Metall den Sauerstoff an den eigentlichen Brennstoff ab, der auf diese Weise verbraucht wird. Das Metall wird hingegen nicht verbraucht und kann anschließend erneut dem Oxidationsreaktor zugeführt werden. Als Endprodukte der Verbrennung entstehen im Idealfall nur Wasserdampf sowie Kohlendioxid, das dann entsprechend abgetrennt werden kann. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die Sauerstoffgewinnung über solche chemischen Prozesse wesentlich weniger Energie erfordert als die herkömmliche Luftzerlegung. Dieser CLC-Prozess ist voraussichtlich sowohl in einem Dampf- wie in einem GuD-Kraftwerk nutzbar. Allerdings besteht auch hier noch erheblicher Forschungsbedarf, so dass dieses Verfahren wohl erst nach dem Jahr 2020 einsatzbereit sein dürfte.

### Die Kohle wird vergast

Das Verfahren ist altbekannt, doch erst in den letzten Jahren hat es neue Aktualität für die Stromerzeugung gewonnen: die Kohlevergasung in Kombination mit einer Gas- und Dampfturbinenanlage (Integrated Gasification Combined Cycle, kurz IGCC). Dabei wird Kohle in einem Vergasungsprozess in ein Brenngas umgewandelt, das – nach einem Reinigungsprozess – die Gasturbine in einem GuD-Prozess antreiben kann. „Das Verfahren erlebt mit Blick auf das Treibhausgas Kohlendioxid eine regelrechte Renaissance“, meint Alfons Kather. Der Grund: „In diesen Prozess kann eine CO<sub>2</sub>-Abtrennung relativ leicht integriert werden.“ Ein Vorteil besteht darin, dass diese Technik – jedoch ohne die CO<sub>2</sub>-Abtrennung – bereits an mehreren Standorten weltweit erprobt wird.

Kohlekraftwerke auf Basis der IGCC-Technologie bieten neben einem hohen Wirkungsgradpotenzial von mehr als 50 Prozent den Vorteil, dass der Wirkungsgradverlust durch die Kohlendioxidabtrennung am geringsten ist. Dazu sind physikalische Waschverfahren, zum Beispiel mit tiefkaltem Methanol, einsetzbar, eine in der chemischen Industrie großtechnisch bewährte Technik. Selbst mit dieser Abscheidung können solche Kraftwerke – zumindest theoretisch – noch einen Wirkungsgrad von mehr als 40 Prozent und damit etwa zwei bis drei Prozentpunkte mehr erreichen als Kraftwerke mit



Versuchsanlage zur Hochdruck-Partialoxidation an der TU Bergakademie Freiberg

den beiden anderen Abtrennverfahren. Ein weiterer Vorteil der Technologie besteht darin, dass sie nicht nur zur Stromerzeugung, sondern auch zur Gewinnung von speicherbaren Energieträgern wie Wasserstoff, Methanol oder Synthetischem Erdgas (SNG) bzw. von Rohstoffen für die Chemieproduktion nutzbar ist.

Es gibt weltweit bereits eine Reihe von IGCC-Kraftwerken ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung, die zum Teil seit Jahren in Betrieb sind. An einigen Standorten kommt in Deutschland entwickelte Technik zum Einsatz. Die Grundlagen der IGCC-Technik werden in verschiedenen Projekten mit BMWi-Mitteln erforscht.

Eine beeindruckende Versuchsanlage befindet sich zum Beispiel auf dem Gelände der TU Bergakademie Freiberg. Hier werden eine ganze Reihe grundlegender und angewandter Forschungsarbeiten geleistet, um IGCC-Anlagen der nächsten Generation besser auslegen zu können.

Das größte Problem der derzeitigen Technologie ist ihre mangelnde Zuverlässigkeit im Vergleich zu anderen Kraftwerkskonzepten. Der deutsche Energieversorger RWE plant derzeit, ein IGCC-Demonstrationskraftwerk mit integrierter CO<sub>2</sub>-Abtrennung zu errichten, das eine Nettoleistung von voraussichtlich 330 Megawatt erreichen und im Jahr 2014 in der Nähe

der rheinischen Stadt Hürth in Betrieb genommen werden soll.

„In der Vergangenheit ist es nicht gelungen, das technische Potenzial dieser Technologie wirklich zu wecken“, so die Auffassung von Alfons Kather. „Wenn man aber an bestimmten Schwachstellen ansetzt und dort neue Lösungen findet, dann ist sie durchaus vielversprechend.“ Dies gilt zum Beispiel für die Kühlung des Rohgases: Nach dem Vergasungsprozess ist das Brenngas zunächst zu heiß für die anschließend notwendigen Reinigungsschritte und muss daher abgekühlt werden. Erst in kühlerem Zustand ist das Rohgas geeignet, eine Kette von chemischen und physikalischen Verfahren zu durchlaufen, durch die es jene Reinheit erhält, die für die Verbrennung in einer Gasturbine notwendig ist. Eine zuverlässige, aber den Wirkungsgrad stark mindernde Variante der Abkühlung ist das so genannte Quenchen: Dabei wird Kühlwasser in das Gas eingespritzt. Neueste Entwicklungen arbeiten mit einem partiellen Quenchen des Synthesegases, wodurch ein Wirkungsgradvorteil erreicht werden kann.

Bevor man die IGCC-Technik und die CO<sub>2</sub>-Abtrennung großtechnisch miteinander verknüpfen kann, müssen noch zahlreiche Herausforderungen bewältigt werden. Ein Beispiel: Zur Abtrennung des CO<sub>2</sub> wird das im Rohgas enthaltene CO durch Zugabe von



Beim Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) wird Kohle in ein Brenngas umgewandelt, das die Dampfturbine eines GuD-Kraftwerkes antreiben kann.

Wasserdampf in  $\text{CO}_2$  und Wasserstoff umgewandelt. Das Kohlendioxid kann anschließend mit herkömmlichen Technologien abgetrennt und gespeichert werden. Das Synthesegas besteht dann aber im Wesentlichen aus Wasserstoff. Damit entsteht eine neue Herausforderung, denn die Verbrennung von Wasserstoff ist eine anspruchsvolle Aufgabe für die Entwickler von Gasturbinen. Entsprechende Arbeiten sind bei verschiedenen Gasturbinenherstellern begonnen worden.

Schließlich gilt es, die Vergasungstechnik zu optimieren, um die Brennstoffflexibilität zu erhöhen, so dass unterschiedliche Energieträger wie Braunkohle, Steinkohle oder Biomasse in einer Anlage genutzt werden können und gleichzeitig die Effizienz gesteigert wird. Diese und weitere Entwicklungsziele sollen im Rahmen von COORETEC in einer engen Kooperation von Forschungseinrichtungen, Komponentenherstellern und Anlagenbetreibern erreicht werden. Wenn eine IGCC-Anlage zusätzlich genutzt werden soll, um neben Strom auch flüssige oder gasförmige synthetische Energieträger (Coal to Gas, CtG, oder Coal to Liquid, CtL) zu erzeugen, sind weitere Entwicklungsschritte nötig. Dafür müssen alle Einzelkomponenten so aufeinander abgestimmt und in den Gesamtprozess integriert sein, dass die Anlage effizient, betriebssicher und mit möglichst hoher Flexibilität betrieben werden kann.

### Kohlendioxidspeicherung

Wenn in den Kraftwerken künftig das Verbrennungsprodukt  $\text{CO}_2$  abgeschieden wird, muss es entweder einer Nutzung zugeführt oder aber so gelagert werden, dass es nicht in die Erdatmosphäre gelangen kann. Eine Möglichkeit besteht darin, es als Flüssigkeit in geologische Schichten im Untergrund zu pumpen, wie etwa in poröse Sandsteinformationen. Prinzipiell lässt sich Kohlendioxid als Gas, Flüssigkeit oder in so genannter überkritischer Phase im Untergrund einlagern. Sein physikalischer Zustand hängt von Druck und Temperatur der Umgebung ab; beide steigen mit zunehmender Tiefe an. Unterhalb von etwa 700 Metern ist der Druck so groß, dass  $\text{CO}_2$  optimal vom porösen Speichergestein aufgenommen wird. Möglichkeiten zur unterirdischen  $\text{CO}_2$ -Lagerung gibt es in der Bundesrepublik in den erschöpften Gasfeldern in Norddeutschland oder in tiefen, Salzwasser führenden Schichten (saline Aquifere). Allein deren Kapazität zur Aufnahme von Kohlendioxid wird von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) auf rund 20 Milliarden Tonnen geschätzt. Zum Vergleich: Ein großes Braunkohlekraftwerk stößt pro Jahr etwa 8,4 Millionen Tonnen  $\text{CO}_2$  aus.

Nur wenn sichergestellt werden kann, dass eingelagertes Kohlendioxid über lange Zeiträume von der Atmosphäre ferngehalten wird, ist es sinnvoll, das Gas in Kraftwerken abzutrennen. Da die ersten Pilotprojekte für die Abtrennung bereits laufen, soll die Erforschung der Langzeitspeicherung intensiviert und beschleunigt werden. Technische Verfahren, mit denen Kohlendioxid in den Untergrund eingebracht wird, sind schon weltweit im Einsatz. Neben Verfahren, die dazu dienen, die Ausbeute von Erdölfeldern zu steigern, werden sie in einigen Erdgasfeldern (Nordsee, Algerien) genutzt, um das bei der Erdgasförderung ebenfalls anfallende  $\text{CO}_2$  wieder untertage zu bringen. In Deutschland wird seit Jahren Erdgas unterirdisch zwischengespeichert. Dennoch sind an eine dauerhafte Speicherung derart großer Mengen an Kohlendioxid neue und höhere Anforderungen zu stellen, die vorrangig erfüllt werden müssen.

Hilfreich für die Forscher und Entwickler ist hier der Blick auf die natürlichen  $\text{CO}_2$ -Lagerstätten, die



Schematische Darstellung der unterirdischen CO<sub>2</sub>-Speicherung. Speichermöglichkeiten bieten etwa ausgebeutete Öl- und Gasfelder oder saline Aquifere.

weltweit in vielen geologischen Formationen vorkommen. Darin ist das CO<sub>2</sub> teilweise seit Jahrmillionen von der Atmosphäre abgeschlossen. Andererseits wird CO<sub>2</sub> vielerorts durch Vulkanismus oder Geysire auf natürliche Weise freigesetzt. Ein beeindruckendes Beispiel für eine solche natürliche CO<sub>2</sub>-Quelle ist der Yellowstone Nationalpark in den USA, wo jährlich rund 16 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre gelangen. Dieses Beispiel macht deutlich, dass potenzielle CO<sub>2</sub>-Lagerstätten mit größter Sorgfalt auszuwählen sind.

Im Rahmen von COORETEC werden alle wichtigen Prozesse zwischen Kraftwerk und Speicherstätte im Detail untersucht. Hier stellen sich zahlreiche Fragen: Welche Probleme können infolge von Verunreinigungen im Gas an Pipeline-Röhren, Pumpen und Verdichtern auftreten? Können in diesen Anlagen oder im Bohrloch Korrosionserscheinungen auftreten? Wie geht man mit dem mit zunehmender Tiefe im Untergrund beständig steigenden Druck um? Welche geochemischen Vorgänge laufen ab, wenn das Kohlendioxid in die geologischen Formationen einströmt? Wie kann man die Lagerstätten und insbesondere die Bohrlöcher so sicher abdichten, dass kein Kohlendioxid an die Erdoberfläche zurück gelangt?

Kompressoren, die geeignet sind, das Kohlendioxid zu verdichten, über größere Entfernungen in Pipelines zu transportieren und dann in große Tiefe zu pumpen, werden bereits seit einigen Jahren in Deutschland entwickelt. Das Unternehmen MAN Turbo hat dazu einen achtstufigen Getriebekompressor gebaut, der das Gas auf einen Enddruck von 187 bar verdichtet. MAN ist an einem Projekt in North Dakota (USA) beteiligt, bei dem das in einer industriellen Kohlevergasungsanlage anfallende CO<sub>2</sub> über Rohrleitungen zu Ölfeldern nach Weyburn in der kanadischen Provinz Saskatschewan gepumpt wird. Hier dient es dann – in die Lagerstätten gepresst – dazu, den Erdölförderdruck zu erhöhen und somit eine bessere Ausbeute und längere Lebensdauer der Ölfelder zu erreichen. Die entsprechende Pipeline ist 350 Kilometer lang und hat einen Rohrdurchmesser von 36 Zentimetern. Jeden Tag fließen derzeit rund 7000 Tonnen Kohlendioxid durch die Rohre und werden in den Untergrund gepresst. Dies steigert nach Angaben des Betreibers die Förderausbeute an Erdöl um 18.000 Barrel täglich.

Voraussetzung für einen sicheren Transport ist die Korrosionsbeständigkeit aller Bauteile. Das gilt vor allem für die Pipeline, die Injektionsanlage mit Verdichter- und Pumpstation sowie für alle Teile der

Injektionsvorrichtungen, über die das Gas in den Untergrund befördert wird. Hier können zum Beispiel CO<sub>2</sub>-beständiger Chromstahl oder auch resistente Innenbeschichtungen eingesetzt werden. Nach Abschluss des Injektionsvorganges, wenn also die Speicherformation die maximal mögliche Gasmenge aufgenommen hat, müssen die Bohrungen aufgefüllt und gasdicht abgeschlossen werden: Ein Austritt von CO<sub>2</sub> ist über lange Zeiträume auszuschließen.

Eine Reihe von aktuellen Forschungsprojekten ist damit befasst, an verschiedenen Standorten in Deutschland unterirdische Lager darauf zu prüfen, ob sie potenziell für eine CO<sub>2</sub>-Einlagerung nutzbar sind. So wird im Rahmen des EU-Projekts CO<sub>2</sub>SINK unter Leitung des GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ) mit zusätzlicher Förderung durch den Bund im brandenburgischen Ort Ketzin erstmals auf dem europäischen Festland CO<sub>2</sub> unterirdisch eingelagert. Seit Herbst 2007 werden dort über einen Zeitraum von zwei Jahren insgesamt rund 60.000 Tonnen CO<sub>2</sub> hoher Reinheit in einen salinen Aquifer unter einem ehemaligen Untergrund-Gasspeicher in eine Tiefe von rund 700 Metern gepumpt. Dabei wird das Verhalten des Gases mit Hilfe von zwei benachbarten Bohrungen überwacht und untersucht.

Um abschätzen zu können, wie viel Kohlendioxid ein bestimmtes Gestein aufnehmen kann, muss die Speichereffizienz untersucht werden. Diese gibt den Anteil des mit CO<sub>2</sub> auffüllbaren Volumens am Gesamtporenvolumen des Speichers an. Kapazitätsabschätzungen gehen von einer durchschnittlichen Speichereffizienz von 20 Prozent aus. Lagerstätten sind allerdings für eine solche Speicherung nur geeignet, wenn geologische Deckschichten vorhanden sind (Ton, Gips oder Salzgestein), welche die Speicherschicht zur Erdoberfläche hin abdichten. Diese dürfen keine undichten Stellen aufweisen, etwa durch frühere Bohrungen oder geologische Besonderheiten.

Im Untergrund treten chemische Prozesse zwischen dem Gas und dem geologischen Material auf. So kann das eingebrachte CO<sub>2</sub> zum Beispiel zur Bildung von Mineralien wie Karbonaten führen. Im ungünstigen Fall entstehen Verbindungen, die ausgewaschen werden können und damit die Stabilität der Lagerformation beeinträchtigen. Auswirkungen auf mögliche chemische Reaktionen hat zum einen die

Reinheit (oder anders ausgedrückt: Art und Konzentration von Verunreinigungen) des zu speichernden Kohlendioxids, zum anderen die Zusammensetzung der Poren, der Gesteine im Reservoir sowie in der Deckschicht. Solche Prozesse gilt es, in der nahen Zukunft eingehend zu erforschen; dazu sind unter anderem Laborversuche vorgesehen, bei denen Gesteine genutzt werden, wie sie auch an den geplanten Standorten anzutreffen sind.

#### Ausblick

Die Steigerung der Effizienz von Kraftwerken sowie Abscheide- und Speichertechnologien für Kohlendioxid (CCS) können einen maßgeblichen Beitrag zur globalen Emissionsminderung leisten; so die Erwartung der EU-Kommission. Diese Technologien nehmen einen hohen Stellenwert bei der Umsetzung des Integrierten Energie- und Klimaprogramms der Bundesregierung ein. Weiterhin hat die Bundesregierung zur Entwicklung von CCS-Technologien im Kabinettsbericht „Entwicklungsstand und Perspektiven von CCS-Technologien in Deutschland“ vom September 2007 Stellung bezogen. Die Dokumente können von der Internetseite [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de) herunter geladen werden.

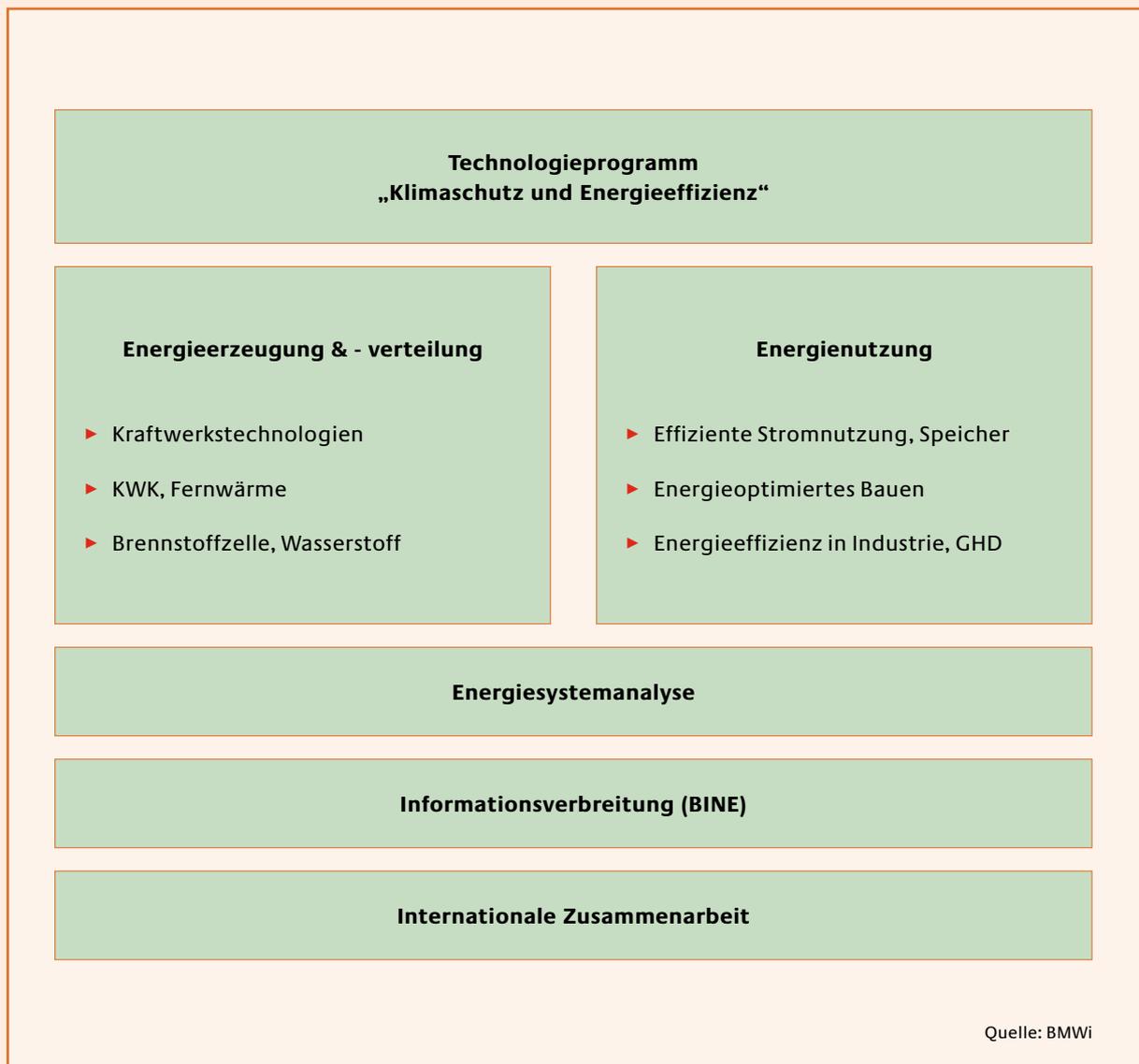
Die internationale Energieagentur (IEA) hat das Potenzial der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung bis zum Jahr 2030 auf weltweit etwa zwei Milliarden Tonnen pro Jahr geschätzt. Der Weltklimarat (IPCC) hat 2005 in einem Gutachten für die Vereinten Nationen die Einschätzung vertreten, dass im Jahr 2050 zwischen 20 und 40 Prozent der weltweiten Kohlendioxidemissionen „zu akzeptablen Preisen“ abgetrennt und gespeichert werden können.

Deutschland steht bei den Forschungs- und Entwicklungsprozessen, die in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen, mit an der Weltspitze, so die Auffassung des COORETEC-Sprechers Professor Alfons Kather: „Beim GuD-Prozess sind die Unternehmen Siemens und Alstom führend. Bei der Kohlendioxidwäsche hat Japan zurzeit noch einen Vorsprung, der hierzulande aber wohl rasch aufgeholt werden wird. Beim Oxyfuel ist niemand so weit wie wir. Und schließlich ist Deutschland das erste Land, in dem ein Kraftwerk auf Basis der IGCC-Technologie inklusive einer CO<sub>2</sub>-Abtrennung entsteht.“

# Querschnittsmaßnahmen

Neben Forschungs- und Entwicklungsprojekten in den sechs Fachbereichen „Moderne Kraftwerkstechnologien“, „KWK, Fernwärme“, „Brennstoffzelle, Wasserstoff“, „Effiziente Stromnutzung, Speicher“, „Energieoptimiertes Bauen“ und „Energieeffizienz in Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ fördert das

BMWi im Rahmen seines Technologieprogramms „Klimaschutz und Energieeffizienz“ Querschnittsmaßnahmen (siehe Abbildung). Dazu gehören die Energiesystemanalyse, die Informationsverbreitung sowie die internationale Kooperation.



## Energiesystemanalyse und das Projekt EduaR&D

Eine wichtige Aufgabe der staatlichen Forschungsförderung ist stets, Entscheidungen über prioritäre und nachrangige Förderbereiche zu treffen. Dies ist durch die Notwendigkeit bedingt, den Forschungs-Euro des Steuerzahlers möglichst effizient und zielgerichtet einzusetzen.

Ein Instrument der wissenschaftlichen Politikberatung als Grundlage solcher Entscheidungen ist die Energiesystemanalyse. Sie liefert nicht nur Ergebnisse, die bei den Entscheidungen der Politik über Klimaschutzmaßnahmen, Technologiepolitik oder Energieforschungsziele Berücksichtigung finden. Darüber hinaus ist die Energiesystemanalyse selbst Gegenstand der Energieforschungsförderung, damit sie neue methodische Ansätze entwickeln und ihre – unter anderem auch durch bisherige Förderung aufgebaute – Infrastruktur sichern und weiter ausbauen kann.

In der Systemanalyse geht es ganz allgemein um die zweckgerichtete Untersuchung von Strukturen der Wirtschaft, des öffentlichen Bereiches und der Gesellschaft. Sie nutzt als Hilfsmittel analytische Modelle – in denen die Ziele des untersuchten Systems sowie Bewertungskriterien formuliert und definiert werden müssen – zur Auswahl möglicher Handlungsalternativen, der Bewertung von Kosten- und Nutzenaspekten sowie Sensitivitätsanalysen und Folgeabschätzungen.

Von 2004 bis 2007 wurde die Projektförderung des BMWi durch die Förderaktivität „Energie-Daten und Analyse R&D“ (EduaR&D) systemanalytisch begleitet. Hierbei ging es um die Entwicklung und Anwendung systemanalytischer Instrumente für die Schwerpunktsetzung in der Energieforschungsförderung.

Ziel von EduaR&D war es, Grundlagen zu schaffen, um aussichtsreiche und in der Entwicklung befindliche Energietechnologien, die zum Erreichen der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung beitragen können, zu identifizieren und zu bewerten. Die Projektergebnisse tragen dazu bei, die Förderpolitik im Energieforschungsbereich zu optimieren, die Fördermittel effizienter einzusetzen und die Systemanalyse als Instrument der wissenschaftlichen Politikberatung zu stärken.

Nach einer Ausschreibung im Frühjahr 2004 wurden insgesamt sechs Vorhaben bewilligt. Zwei der Vorhaben beschäftigten sich mit übergeordneten Fragen der Systemanalyse und Methodik, um Entscheidungskriterien für eine effiziente Förderstrategie für Forschung und Entwicklung bzw. Konzepte für die Schwerpunktsetzung in der Energieforschung zu entwickeln. Vier weitere Vorhaben führten Technologieanalysen und -bewertungen zu den Förderbereichen „Brennstoffzellen/ Wasserstoff“, „Strom- und Wärmeerzeugung“ und „Gebäude“ durch.

Bei der kritischen Diskussion der Ergebnisse des Projekts EduaR&D zeigte sich, dass die Prognose von geeigneten Entwicklungslinien stark von der untersuchten Technologie abhängt. Während bei Technologien, die sich noch in einem frühen Stadium befinden (etwa Brennstoffzellen, Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung), die Ableitung konkreter Entwicklungsziele relativ gut möglich ist, ist dies in ausgereiften Bereichen (etwa Passivhäuser oder Industriefeuerungen) viel schwieriger. Unter anderem hatte EduaR&D zum Ergebnis, dass

- ▶ die Einbeziehung konkurrierender und/oder marktgängiger Techniken unabdingbar ist, um die Entwicklungschancen von innovativen Techniken vergleichend zu analysieren,
- ▶ die Beobachtung der Entwicklungen im Ausland dazu beitragen kann, Fehlentwicklungen frühzeitig zu erkennen,
- ▶ das Kostendegressionspotenzial neuer Techniken methodisch und empirisch noch wenig fundiert ist,
- ▶ die Wirtschaftlichkeit neuer Techniken darüber hinaus stark von der Annahme zukünftiger Energie- und Brennstoffpreise beeinflusst wird und
- ▶ externe Kosten (etwa Art der Zuteilung von Emissionszertifikaten) die Rangfolge der Technologien beeinflussen.

Grundsätzlich hat sich herausgestellt, dass sich das große Potenzial der Systemanalyse auch auf andere Themengebiete ausweiten ließe. Aus fachlicher Sicht wäre beispielsweise die Nutzung der EduaR&D-Ergebnisse für die Aufstellung langfristiger Technologieszenarien oder auch für eine Technologiebewertung im Bereich der erneuerbaren Energien interessant.

## Informationsverbreitung BINE-Informationdienst

Zu den Aufgaben der Energieforschungspolitik gehört auch die Verbreitung der Ergebnisse von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben, um die Markteinführung neuer Technologien zu beschleunigen. Voraussetzung dafür ist ein gezielter Wissenstransfer zu den Multiplikatoren und Nutzern von Forschungsergebnissen. Dazu gehört die sachgerechte Aufarbeitung technischer Sachverhalte, die dem Anwender zeitnah, verständlich aufbereitet und in kompakter Form zur Verfügung gestellt werden.

Das BMWi in seiner Rolle als federführendes Ressort für die Energieforschung der Bundesregierung unterstützt die gezielte Informationsverbreitung von Forschungsergebnissen im Energiebereich vor allem durch BINE Informationsdienst, ein Service von FIZ Karlsruhe, als Schnittstelle zwischen Forschung und Wirtschaft.

BINE ist der zentrale, bundesweite Informationsvermittler für Ergebnisse der Energieforschung auf den Gebieten „Energieeffizienztechnologien“ und „Erneuerbare Energien“. Aktuelle wissenschaftlich-technische Informationen aus der Forschung werden durch die BINE-Fachredaktion recherchiert, zielgruppenorientiert aufbereitet und in verschiedenen BINE Info-Reihen publiziert:

- ▶ Projektinfos informieren zeitnah über Ergebnisse aus Forschungs- und Demonstrationsvorhaben
- ▶ Themeninfos fassen projektübergreifend Ergebnisse aus Forschung und Praxis zusammen
- ▶ „basisEnergie“-Infos befassen sich mit Grundlagen ausgewählter Energiethemen
- ▶ Die Buchreihe „BINE-Informationspakete“ dokumentiert aktuelles, in der Praxis verwertbares Forschungswissen und Anwendungs-Knowhow.

Die gut etablierten BINE-Publikationen werden systematisch im Internet mit weiteren Informationen und Angeboten vernetzt und durch das BINE-Redaktionstelefon ergänzt. Die elektronische Informationsverbreitung beinhaltet neben dem BINE-Newsletter vor allem Webportale, die von BINE erstellt bzw. redaktionell betreut werden.

Primäre Zielgruppen der BINE-Fachinformationen sind insbesondere die mittelständische Wirt-



BINE-Infos beschäftigen sich mit dem energieeffizienten Bauen, Industrieverfahren und Best-Practice-Beispielen.

schaft, Experten, Entscheidungsträger, Investoren sowie Multiplikatoren u. a. im Bildungsbereich.

### Ausblick

Auch künftig wird das BMWi die Informationsverbreitung durch BINE unterstützen und dabei die Weiterentwicklung und den Ausbau des BINE-Informationsangebots forcieren. Dabei geht es insbesondere um die Integration neuer Verbreitungswege und Medien sowie die Einbeziehung weiterer Institutionen und Verbände aus den relevanten Branchen, um die Multiplikatorwirkung zu verbessern. Auch die Unterstützung des internationalen Informationstransfers wird ein neuer Schwerpunkt sein.

### BINE Webdienste:

[www.bine.info](http://www.bine.info)

[www.energie-projekte.de](http://www.energie-projekte.de)

[www.energiefoerderung.info](http://www.energiefoerderung.info)

[www.enob.info](http://www.enob.info)

[www.eneff-stadt.info](http://www.eneff-stadt.info)

[www.eneff-waerme.info](http://www.eneff-waerme.info)

info

# Internationale Zusammenarbeit in der Energieforschung

## EU-Förderung im Energiebereich

Die EU fördert Forschung und Entwicklung auf Basis mehrjähriger Forschungsrahmenprogramme (FRP). Grundlage für die FRP ist der EG-Vertrag, Art. 163 - 173. Ziel ist es, die wissenschaftlichen und technologischen Grundlagen der Industrie zu stärken, die Entwicklung ihrer internationalen Wettbewerbsfähigkeit zu fördern und den europäischen Forschungsraum (ERA) auszubauen.

Seit Anfang 2007 läuft das 7. Forschungsrahmenprogramm (2007–2013). Insgesamt stehen für das 7. FRP 53,2 Milliarden Euro zur Verfügung. Die nicht-nukleare Energieforschung ist eine von 10 thematischen Prioritäten, für die 2,35 Milliarden Euro vorgesehen sind. Anträge für Forschungsprojekte können auf Basis von so genannten „Calls“, die jährlich veröffentlicht werden, eingereicht werden. Der Programm Ausschuss Energie, in dem das BMWi die Bundesregierung vertritt, unterstützt, berät und kontrolliert die Europäische Kommission bei der Erarbeitung und Umsetzung der „Calls“.

Um Synergievorteile zwischen nationaler und europäischer Förderpolitik zu realisieren, beteiligt sich das BMWi im Rahmen des FRP an so genannten Europäischen Technologieplattformen wie z.B. „Zero Emission Fossil Fuel Power Plants ZEP“ und „Electricity Networks of the Future“ sowie an so genannten ERA-Nets („Hydrogen and Fuel Cells – HyCo“ und „Fossil Energy Coalition – FENCO“).

Um den Erfolg und die Effizienz deutscher Antragstellerinnen und Antragsteller zu gewährleisten, ist es überaus wichtig, die Informationen über die Inhalte, die Prozeduren und die Bedingungen der EU-Förderprogramme unter den Unternehmen, Forschungseinrichtungen und staatlichen Stellen in Deutschland möglichst schnell und umfassend zu verbreiten. Dazu setzt die Bundesregierung Nationale Kontaktstellen (NKS) ein. Mit der Wahrnehmung der Aufgaben einer NKS im Energiebereich wurde der Projektträger Jülich durch das BMWi beauftragt; betreut wird das Thema Energie im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm und das Programm Intelligente Energie – Europa (IEE).

Als Mitglied im Netzwerk der NKS informiert und berät die NKS-Energie auf fachlicher und wettbewerbs-

neutraler Basis. Darüber hinaus kooperiert sie auch auf europäischer Ebene mit anderen Informations- und Beratungsstellen für Programme der Europäischen Union. Die NKS-Energie strebt eine angemessene Beteiligung deutscher Partner an den Förderprogrammen der Europäischen Union im Bereich der nicht-nuklearen Energien an und steht dabei in engem Kontakt zur Europäischen Kommission.

Da die EU-Förderung durch jährliche Arbeitsprogramme und Aufrufe erfolgt und regelmäßig Antragsfristen bestehen, ist die fachliche und prozedurale Beratung der potenziellen deutschen Antragsteller und Multiplikatoren durch die NKS-Energie besonders wichtig. Ein vorrangiges Ziel dabei ist, ständig die Qualität und Effizienz der Anträge deutscher Antragsteller zu verbessern und damit die Chancen für eine Förderung, die in der Regel bei ca. 50 Prozent der Gesamtaufwendungen eines Forschungsprojektes liegt, zu erhöhen. Die Erfahrung aus bisherigen Rahmenprogrammen zeigt, dass deutsche Anträge eine Erfolgsquote von 15 bis 20 Prozent erreichen, d.h. nahezu jeder fünfte deutsche Antragsteller erfährt eine Förderung durch die EU.

In ihrer Beratungsfunktion arbeitet die NKS-Energie eng mit Multiplikatoren vor Ort zusammen. Dies sind zum Beispiel die Industrie- und Handelskammern, EU-Büros an Hochschulen und andere Beratungseinrichtungen. Die NKS führt eigene Beratungs- und Informationsveranstaltungen durch, und ihre Mitarbeiter stehen für Veranstaltungen anderer Organisationen zur Verfügung. Auch die Hilfestellung bei der Suche nach kompetenten und geeigneten Partnern für die Kooperation in einem Forschungsprojekt wird den Antragstellern angeboten. Da die NKS-Energie – wie alle NKS – von der Bundesregierung finanziert wird, ist die Tätigkeit der NKS grundsätzlich kostenfrei und auch interessenneutral. Alle Anfragen werden vertraulich behandelt.

## Internationale Energieagentur (IEA)

Deutschland ist Gründungsmitglied der seit 1974 bestehenden Internationalen Energieagentur (IEA). Die IEA bietet heute den 28 Mitgliedstaaten ein breites Forum zur gemeinsamen Abstimmung wichtiger Energiefragen. Darüber hinaus ist sie eine



Flaggen von EU-Mitgliedsländern in Brüssel

Plattform für internationale Forschungskooperationen, deren Schwerpunkte in den Bereichen erneuerbare Energien, fossile Energieträger, Energieeffizienz sowie Kernfusion liegen. Im Prinzip sind die IEA-Forschungskooperationen für alle Länder offen, die der Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Entwicklung von Energietechnologien Bedeutung zumessen. Im Fokus der IEA liegt gegenwärtig eine stärkere Beteiligung von Ländern wie China, Indien oder Russland.

Deutschland hat von Beginn an aktiv im Rahmen des IEA-Forschungs- und Technologieprogramms teilgenommen – Wirtschaft und Wissenschaft sind inzwischen an 27 der insgesamt 41 laufenden IEA-Projekte beteiligt. Gefördert wird:

- ▶ die Entwicklung neuer Technologien, die zu einem globalen, nachhaltigen und umweltschonenden Energiesystem beitragen sollen,
- ▶ der intensive internationale Informationsaustausch über die neuesten Entwicklungen auf dem jeweiligen Technologiegebiet,
- ▶ die Verbreitung und Markteinführung auf Basis eines heute in vielen Bereichen weit fortgeschrittenen Entwicklungsstandes der Energietechnologien sowie
- ▶ die Bearbeitung der Probleme des weltweiten Klimaschutzes, insbesondere der Treibhausgasemissionen im Energiesektor.

Deutschland beteiligt sich auf dem Sektor Energieforschung und -technologien weiterhin durch Teilnahme an ad hoc eingesetzten internationalen

Gruppen, die besondere Fragestellungen beraten wie etwa die Rolle der Grundlagenforschung. Zudem liefert es Expertenbeiträge zu den internationalen Workshops der IEA und beteiligt sich regelmäßig mit Beiträgen an den vielen Veröffentlichungen der IEA.

Alle Aktivitäten im Bereich der Energieforschung werden durch das so genannte CERT (Committee on Energy Research and Technology) koordiniert, in dem das BMWi die Bundesregierung vertritt. Unterstützt wird das BMWi dabei durch den Projektträger Jülich (PtJ).

Die in der IEA-Zusammenarbeit gewonnenen Kontakte, Erfahrungen und Kenntnisse werden für die Projektarbeit im Rahmen des nationalen 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, für die Weiterentwicklung der nationalen Forschungs- und Förderprogramme sowie für die Analyse und Verbesserung der energieforschungspolitischen Strategien im Lichte der internationalen Entwicklung genutzt.

#### Multilaterale Initiativen der Energieforschung

Das BMWi engagiert sich auch in multilateralen Initiativen zur Energieforschung, wie z. B. dem Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF) im Bereich von Kraftwerkstechnologien zur Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> und der International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE) bei Wasserstofftechnologien.

# Perspektiven der Energieforschung für mehr Energieeffizienz

von Eberhard Jochem

Ohne einen einzigen Forschungs-Euro für neue Technik zu bemühen, könnten die Energieverluste in den Industriestaaten allein mit heute verfügbarer und rentabler Technologie halbiert werden. Trotz dieser positiven Chancen würde sich, angesichts der Herausforderungen von Klimawandel und begrenzten Ölproduktionsmöglichkeiten, nichts grundsätzlich verändern: Spätestens 2040 würde der Weltenergiebedarf wegen des weiter steigenden globalen Brutto-sozialprodukts wieder zunehmen. Sind also neue Energieeffizienz-Potenziale möglich, die den heutigen Faktor 2 im Laufe der kommenden Jahrzehnte noch erhöhen? Und wie schnell stehen nicht-fossile Primärenergieträger bereit, um die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen in etwa 20 Jahren stagnieren und anschließend auf 1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Kopf am Ende dieses Jahrhunderts absinken zu lassen? (Deutschland heute: 10 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr).

## Herausforderung Effizienz

Diese Fragen lenken den Blick auf die Energieforschung, deren Budgets in den OECD-Ländern seit Ende der 1980er Jahre real um mehr als 50 Prozent auf knapp 10 Milliarden Dollar im Jahr 2005 rückläufig waren und derzeit seitens der öffentlichen Forschungsförderung den interessanten Betrag einer Kinokarte pro Kopf und Jahr erreichen. Tatsächlich werden die Forschungsaufwendungen im Energiebereich wesentlich von der Investitionsgüterindustrie getragen. Neben der Frage nach der Höhe der finanziellen Forschungsaufwendungen drängt sich eine weitere Frage auf: Wie effizient ist eigentlich der investierte Energieforschung-Euro? Da scheint es Verbesserungspotenziale bei fast allen Akteuren zu geben, hier eine kleine Auswahl:

- ▶ Die institutionelle Förderung der Großforschungszentren in der Helmholtz-Gemeinschaft wurde seit Anfang dieses Jahrzehnts neu ausgerichtet, befindet sich aber insgesamt noch in einem personellen Umstrukturierungsprozess. Es wird sicherlich noch einige Jahre dauern, bis die Forschungszentren

wirklich fit für die Herausforderungen der Zukunft sind.

- ▶ Die Zusammenarbeit der Industrie mit den Universitäten und Fachhochschulen ist noch nicht optimal. Sie wird primär von der Kompetenz und Kooperationsfähigkeit der Lehrstühle und nur in zweiter Linie durch die Höhe der zur Verfügung stehenden staatlichen Fördermittel bestimmt.

- ▶ Kompetenzaufbau ist eine langfristige Aufgabe, eine Erhöhung der staatlichen Fördermittel für energietechnische Grundlagenforschung an Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen wird erst mittelfristig die Kooperationen mit der Industrie beflügeln und den Technologietransfer vom Labor zum Markt beschleunigen.

- ▶ Durch mehr Austausch (auch von Lehrinhalten) und Kooperationen kann die Effizienz der Energieforschung in Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen gesteigert und können Doppelarbeiten vermieden werden. Dabei soll der wissenschaftliche Wettbewerb nicht eingeschränkt, aber es sollten mehr Zielorientierung und komplementäre Forschung in organisierter Weise abgestimmt werden.

- ▶ Die Internationale Energieagentur (IEA) stellte 2006 fest, dass von der Energieeffizienz der größte Beitrag (etwa zwei Drittel) zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der nächsten 25 Jahre zu erwarten ist. An der ETH-Zürich postulierten Wissenschaftler im Jahr 2003, dass die Nutzung von Energie bis zum Ende dieses Jahrhunderts um den Faktor 5 verbessert werden könne. Diesen Fokus auf die Nutzung gilt es, in der Energieforschungspolitik umzusetzen, in der seit fünf Dekaden der Gedanke dominiert, das Energieangebot zu erweitern.

Effizienz der Energieforschung kann somit gewiss an vielen Orten, mit thematischer Fokussierung und mehr Kooperation mit der Investitionsgüter- und der chemischen Industrie verbessert werden; auch mehr Anerkennung der Forscher und fachlich begrün-

detes Umschichten der finanziellen Inputs sind hilfreich.

### Risiken und Chancen der Energieforschung

Im Bereich der energieoptimierten Gebäude, der erneuerbaren Energien, der hocheffizienten thermischen Kraftwerke und der Kfz-Technik behauptet sich die Forschung in Deutschland sehr gut im internationalen Wettbewerb. Bei den beiden zuletzt genannten Technologiebereichen besteht allerdings die Gefahr, dass die staatlich geförderte angewandte Grundlagenforschung an den Universitäten nicht mehr mit der Industrieforschung mithalten kann. Schon die schiere Größe selbst von Pilotanlagen übersteigt die Dimensionen von Forschungslabors auf Institutsebene.

Die Aufteilung der Energieforschung in Deutschland auf vier Bundesministerien (Wirtschaft und Technologie; Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bildung und Forschung; Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz) und damit verbundene Arbeitsteilung zwischen den Ressorts ist auch die Folge von Verhandlungen von Regierungsbildungen der vergangenen zwei Jahrzehnte, aber sie birgt bei hoher Abstimmung zwischen den Ressorts enorme Vorteile einer durchgängigen Beförderung neuer Technologielinien vom Forschungslabor in die Markteintrittsphase. Diese Arbeitsteilung eröffnet ein Beschleunigungspotenzial von Innovationen in den vier Ressorts.

Systemische Forschung, die die gesamte Energiekette im Auge hat, kann durch gute Abstimmung zwischen den Ressorts befördert werden. Bei den neuen physikalisch-chemischen und biotechnologischen Verfahren oder der Werkstoffforschung sollte unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz der Forschung allerdings eine stärkere „Radaraufgabe“ übertragen werden. Diese beiden Beispiele verdeutlichen einerseits die Chancen durch Kooperationen zwischen den Ressorts und andererseits durch ein zielorientiertes Verhalten innerhalb der Ressortforschung unter dem Blickwinkel gesellschaftlichen Bedarfs bei neuen Querschnittstechnologien.

Die Klimapolitik leidet unter einer weltweiten Diskussion, die mit Scheuklappen ausschließlich auf

die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten schießt und die Anpassungs- und Schadenskosten ausklammert. Diese Einseitigkeit wird auch durch ökonomische Modellbetrachtungen verursacht, in denen häufig noch keine Informationen zu den Adaptations- und Schadenskosten Eingang gefunden haben. Hier sind Bundesregierung und EU-Kommission gefordert, um ihre (zu Recht) hochgesteckten Ziele argumentativ im globalen Gesamtkontext zu begründen.

Europäische und internationale Forschungskooperationen sind häufig durch die geforderte ausgewogene nationale Zusammensetzung der Projekte nur mäßig erfolgreich. Rein nationale oder bi- und trinationale Förderung mit komplementär starken Forschungspartnern würden den Forschungs-Euro sicherlich häufig effizienter wirken lassen.

Die Bundesregierung und die EU-Kommission sollten die von der US-Regierung vorgeschlagene Technologie-Initiative vollen Herzens aufgreifen – zusätzlich zum Kyoto-Prozess. Denn im Unterschied etwa zu Emissionszertifikaten können neue Technologien ganz konkret schädliche Emissionen vermeiden und Ressourcen schonen.

### Ein (optimistisches) Fazit

Die Herausforderungen an Veränderungen des heutigen globalen Energiesystems – und damit an die Energieforschung in ihrer ganzen interdisziplinären Vielfalt – sind gigantisch. Es mangelt letztlich nicht an technischen Ideen und Lösungen. Es mangelt derzeit noch an der Erkenntnis seitens der Akteure in Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung sowie bei den Wählern und Konsumenten, dass diese Herausforderungen beherzt aufgegriffen werden müssen. Für diesen Prozess des Aufgreifens von Chancen und Optionen gilt es, Kommunikation, finanzielle Anreize und Forschungsplattformen zu fördern. Erste Auswirkungen des Klimawandels und die Erfahrung der letzten Jahre, dass Versorgungssicherheit von Energie kaum militärisch erzwungen werden kann, fördern sicherlich diesen notwendigen Umdenkprozess.

Da erscheint eine langfristig und effizient angelegte Energieforschung eher Ziel führend. Es darf auch

etwas mehr an Steuergeldern für dieses Anliegen sein als der Wert einer jährlichen Kinokarte pro Kopf. Denn wegen der gewaltigen erforderlichen Veränderungen des gesamten globalen Kapitalstocks geht es nicht mehr allein um Energieforschung, es geht um die technische und unternehmerische Innovation in allen

Bereichen einer Industriegesellschaft in den kommenden Jahrzehnten auf dem Weg zu einem nachhaltigen Kapitalstock mit einer um Potenzen verbesserten Energieeffizienz und einem sehr hohen Anteil erneuerbarer Energiequellen im Primärenergieeinsatz.

# Förderinformationen

Im Rahmen des BMWi-Technologieprogramms „Klimaschutz und Energieeffizienz“ können Projekte der Industrie, von Universitäten und Forschungsinstituten gefördert werden, die sich durch Exzellenz auszeichnen und wesentliche technologische Beiträge für die Umgestaltung der Energiesysteme hinsichtlich Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit liefern. Die Forschungsförderung dient primär dazu, hohe Entwicklungsrisiken abzufedern und die Entwicklung neuer Technologien zu beschleunigen. Durch gemeinsame Verbundforschungsprojekte von Wirtschaft und Wissenschaft gelingt es, das Innovationspotenzial von Klein- und Mittelständischen Unternehmen zu integrieren.

Mit der fachlichen und administrativen Betreuung des BMWi-Technologieprogramms „Klimaschutz und Energieeffizienz“ ist der Projektträger Jülich (PtJ), angesiedelt im Forschungszentrum Jülich, beauftragt. Dort sind weitere Informationen erhältlich.

Die Begutachtung der Projekte geschieht in einem zweistufigen Prozess durch das BMWi und den PtJ.

## **Kontakt**

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Projektträger Jülich (PtJ)  
52425 Jülich

## **Ansprechpartner:**

### **Grundsatzfragen und Internationales:**

Dr. Sabine Semke  
Tel.: 02461 61-2738  
Fax: 02461 61-2880  
E-Mail: [s.semke@fz-juelich.de](mailto:s.semke@fz-juelich.de)

### **Rationelle Energienutzung:**

André Le Marié  
Tel.: 02461 61-6977  
Fax: 02461 61-3131  
E-Mail: [a.le.marie@fz-juelich.de](mailto:a.le.marie@fz-juelich.de)

### **Effiziente Energieumwandlung**

Dr. Jochen Seier  
Tel.: 02461 61-3267  
Fax: 02461 61-3131  
E-Mail: [j.seier@fz-juelich.de](mailto:j.seier@fz-juelich.de)

## **Internet**

[www.foerderdatenbank.de](http://www.foerderdatenbank.de)  
[www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)  
[www.fz-juelich.de/ptj](http://www.fz-juelich.de/ptj)





Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie herausgegeben. Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung. Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.